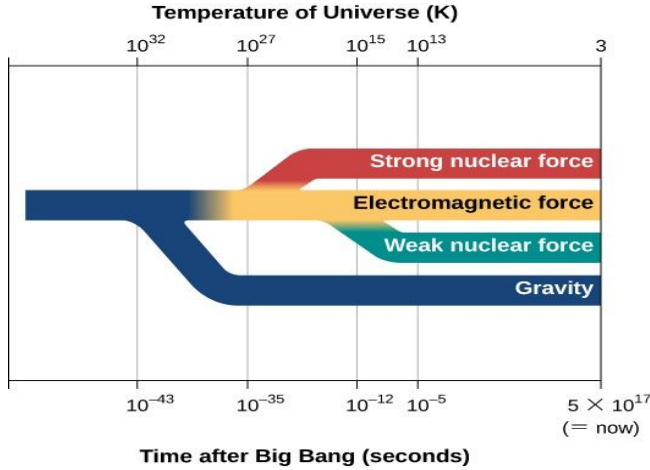


Ծանր իոնների ֆիզիկան և ALICE-ը LHC-ում

Heavy Ions Physics and **A** Large Ion **C**ollider **E**xperiment

Օգտագործված նյութեր՝ [P.Hristov](#), [F.Bellini](#)

Մասնիկների ֆիզիկայի Ստանդարտ Մոդել



Այսօր հայտնի չորս հիմնարար փոխազդեցությունները՝

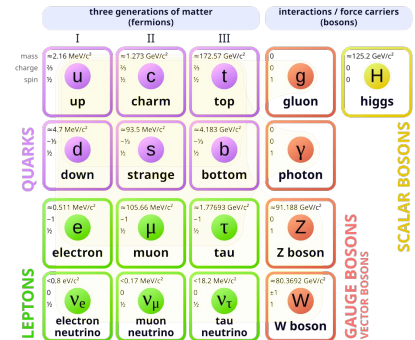
- գրավիտացան,
- էլեկտրամագնիսականությունը,
- ուժեղ փոխազդեցությունը,
- թույլ փոխազդեցությունը

առաջացել են միասնական ուժից՝ բաժանման (տարբեր սիմետրիաների խախտման շնորհիվ) միջոցով տիեզերքի Մեծ Պայթյունից հետո ընդլայնվելու և սառչելու ընթացքում

Համաձայն մասնիկների ֆիզիկայի Ստանդարտ Մոդելի՝ նյութը կազմված է ֆերմիոններից (1/2 սպին ունեցող քվարկներից և լեպտոններից), որոնք փոխազդում են վեկտորական (սպին 1) բոզոնների փոխանակման միջոցով:

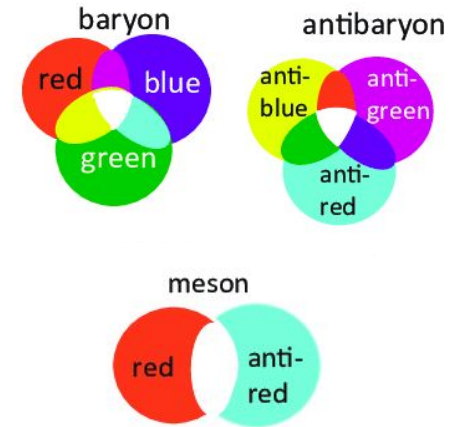
Հիգգսի մասնիկը (սպին 0) հատուկ դեր է խաղում ուրիշ մասնիկներին զանգված տալով:

Standard Model of Elementary Particles



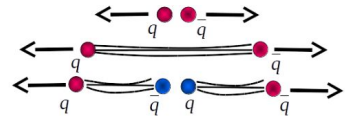
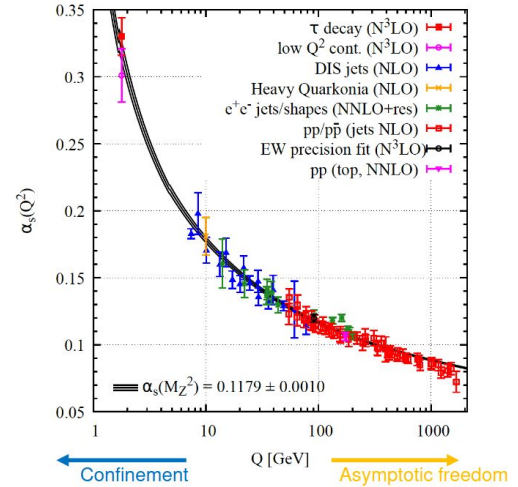
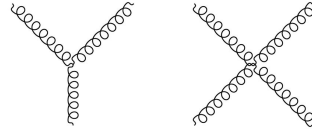
Քվանտային Քրոմոդինամիկա (QCD)

- Դիտարկելի նյութը (կազմում է տիեզերքի ընդհանուր նյութի մոտ 4.5%-ը) բաղկացած է բարիոններից, որոնք քվարկների կապված վիճակներն են (ոչ ստաբիլ մեզոնների հետ միասին՝ հադրոններ)
- Քվարկների միջև ուժեղ փոխազդեցությունը իրականացվում է գլուոնների միջոցով և ուսումնասիրվում է Քվանտային Քրոմոդինամիկայով
- Քվարկները բևուռագրվում են գույնային լիցքով: **կարմիր**, **կանաչ**, **կապույտ** (Էլեկտրական լիցքի հետ հանդերձ):
- Ինչպես Էլեկտրական լիցքը կարող է ունենալ դրական կամ բացասական նշան, այնպես էլ քվարկները ունեն հակագույն:
- Բոլոր դիտարկվող կապված վիճակները գունազերծ են:

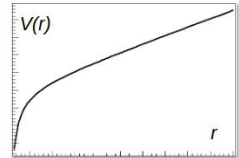


Քվանտային քրոմոդինամիկա (QCD)

- Ի տարբերություն էլեկտրամագնիսական Փոխազդեցությունների (փոխանցվում են չեզոք ֆոտոններով), գլյուոնները նույնպես ունեն գույնային լիցք (կարող են ճառագայթել գլյուոններ):
Սա ՔԲԴ-ն ընդհանուր առմամբ դարձնում է ոչ-պերտուրբատիվ փոխազդեցության ուժը $\alpha(Q^2)$ կախված է փոխանցված իմպուլսից (Q)
- Միայն մեծ փոխանցվող իմպուլսով (կարճ հեռավորություններ) բնութագրվող պրոցեսները կարող են հաշվարկվել այս կապի ուժի աստիճաններով շարքի միջոցով:
- Ուժեղ փոխազդեցության ուժի աճը հեռավորության մեծացման հետ բերում է գույնային կոնֆայնմենթի (“բանտարկության”) անհնար է քվարկը կամ գլյուոնը հաղորակից դուրս բերել:
- Դրա հակառակը, փոքր հեռավորություններում (հաղորդի ներսում) փոխազդեցության ուժը թուլանում է՝ քվարկները և գլյուոնները հաղորդի ներսում իրենց ազատ մասնիկների նման են պահում՝ ասիմպտոտիկ ազատություն:

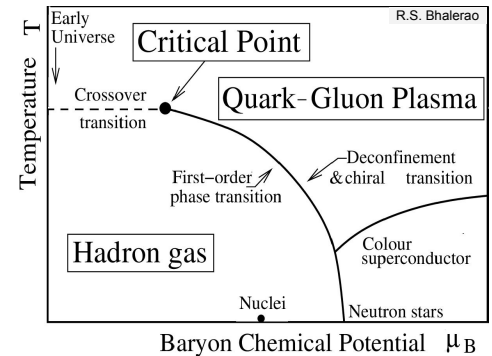
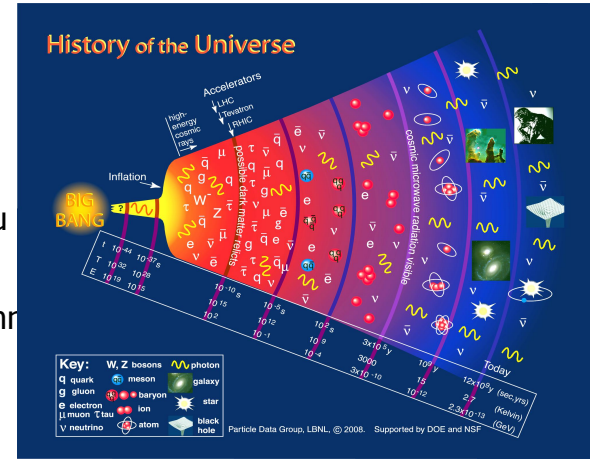


$$V(r) = -\frac{a}{r} + \sigma r$$

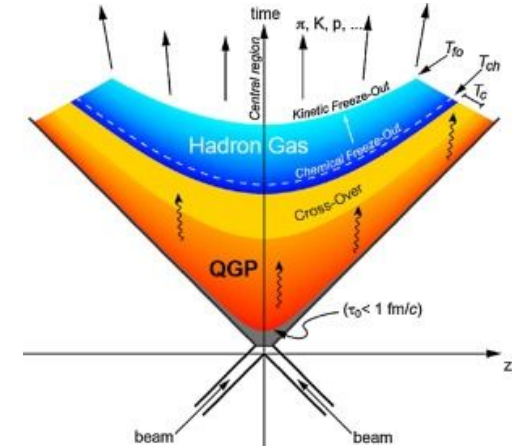
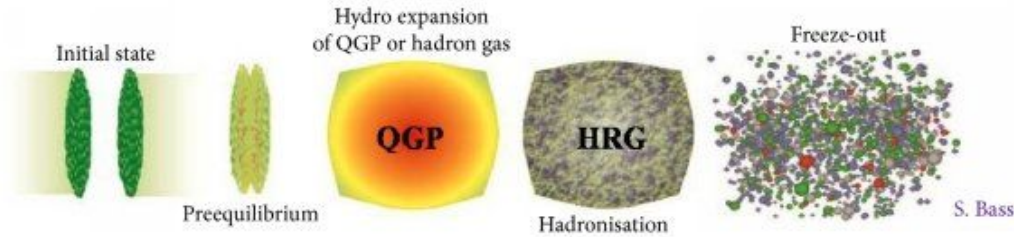


Քվարկ-Գլյուոնային Պլազմա, QGP (Quark-Gluon Plasma)

- Ենթադրվում է, որ Մեծ Պայթյունից հետո $\sim 10^{-5}$ վայրկյան անց գոյություն է ունեցել նյութի այլ վիճակ՝ Քվարկ-Գլյուոնային Պլազմա, որտեղ քվարկները և գլյուոնները կապված չեն եղել առանձին հադրոնների մեջ, այլ ազատորեն շարժվել են հեղուկանման միջավայրում
- Երբ տիեզերքը սառեց մինչև ~ 150 MeV ($\sim 1.75 \times 10^{12}$ K!), այն ենթարկվեց փուլային անցման՝ վերածվելով մեր սովորական հադրոնային նյութի
- Ծանր իոնների ֆիզիկան փորձում է վերաստեղծել վաղ տիեզերքի պայմանները փրժավալում՝ արագացուցչով շատ բարձր արագուտջան հասցրած միջուկները իրար բախելով
- QCD-ն բնութագրվում է քիրալ սիմետրիայի խախտմամբ՝ բացահայտ (շնորհիվ քվարկային ոչ զրո զանգվածների), և՛ ինքնաբուխ (սիմետրիկ վիճակը ՔԿԴ վակուումի ամենացածր էներգետիկ վիճակը չէ):
Վերջինս պատասխանատու է հադրոնների նրանց բաղադրիչ քվարկների զանգվածների գումարից շատ ավելի բարձր զանգվածների համար:
- Ենթադրվում է, որ QGP անցման շրջանում նաև ինքնաբուխ խախտված քիրալ սիմետրիան է վերականգնվում



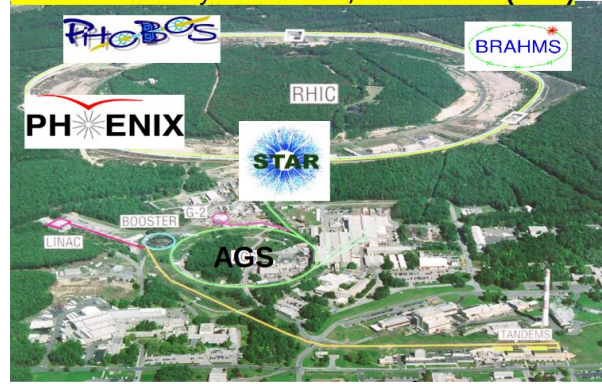
Քվարկ-Գլյուոնային Պլազմա, QGP (Quark-Gluon Plasma)



- Ցավոք, մենք չենք կարող ուղղակիորեն ուսումնասիրել QGP-ն, քանի որ հնարավոր է դիտարկել միայն այն մասնիկները, որոնք ստեղծվում են հադրոնիզացիայի և սառչման (freeze-out) հետո:
- Մենք ստիպված ենք հիմնվել (ոչ միանշան!) տեսական կանխատեսումների վրա, թե ինչպես կարող է QGP փուլը ազդել դիտարկումների վրա, օրինակ՝
 - տարօրինակ և հմայիչ (s- և c- քուարկեր պարունակող) մասնիկների արտադրության ուժեղացում
 - հիդրոդինամիկական հոսքեր
 - ջերթերի “հանգեցում” (ճնշում)
 - J/ψ (և ուրիշ $c\bar{c}$ մեզոնների) ելքի անկում
 - հադրոնների զանգվածների փոփոխությունները
 - ջերմային ֆոտոններ և դիլեպտոններ

Արագացուցիչներ և ճանր իոնների էքսպերիմենտներ

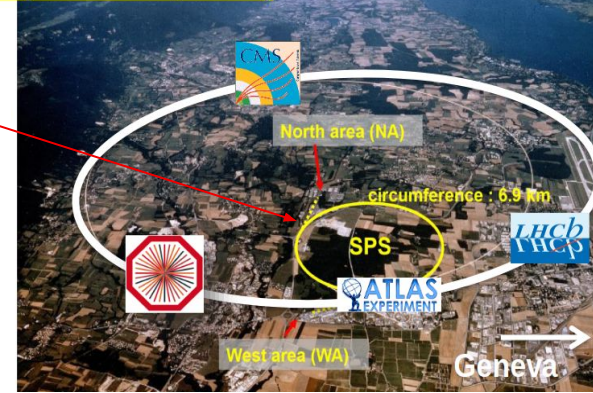
Relativistic Heavy Ion Collider, Brookhaven (USA)



Բրուքհեյվեն RHIC (գործում է 2000 թ)

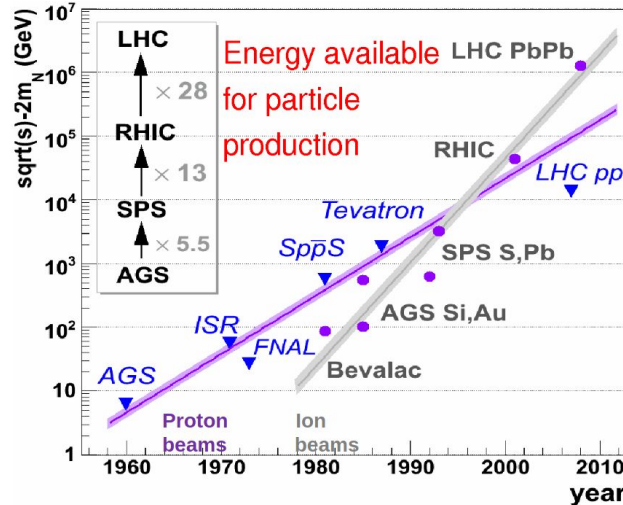
- Շրջագիծը՝ 3.83 կմ, 2 օղակ
- Գերհաղորդ. մագնիսներ
- $\sqrt{s_{NN}}$: 3–200 GeV Au-Au
- Փնջի էներգիայի սկան I: 2010-11
- Փնջի էներգիայի սկան II: 2019-22
- Ընթացիկ էքսպերիմենտ՝ STAR

Super Proton Synchrotron and Large Hadron Collider, CERN (Switzerland/France)



CERN SPS (գործում է 1986 թ)

- Շրջագիծը՝ 6.9 կմ
- $P_{max} = 450 \text{ GeV A/Z}$ (ֆիքսած թիրախ)
- $\sqrt{s_{NN}} < 20 \text{ GeV/A}$
- Ընթացիկ՝ NA61/Shine

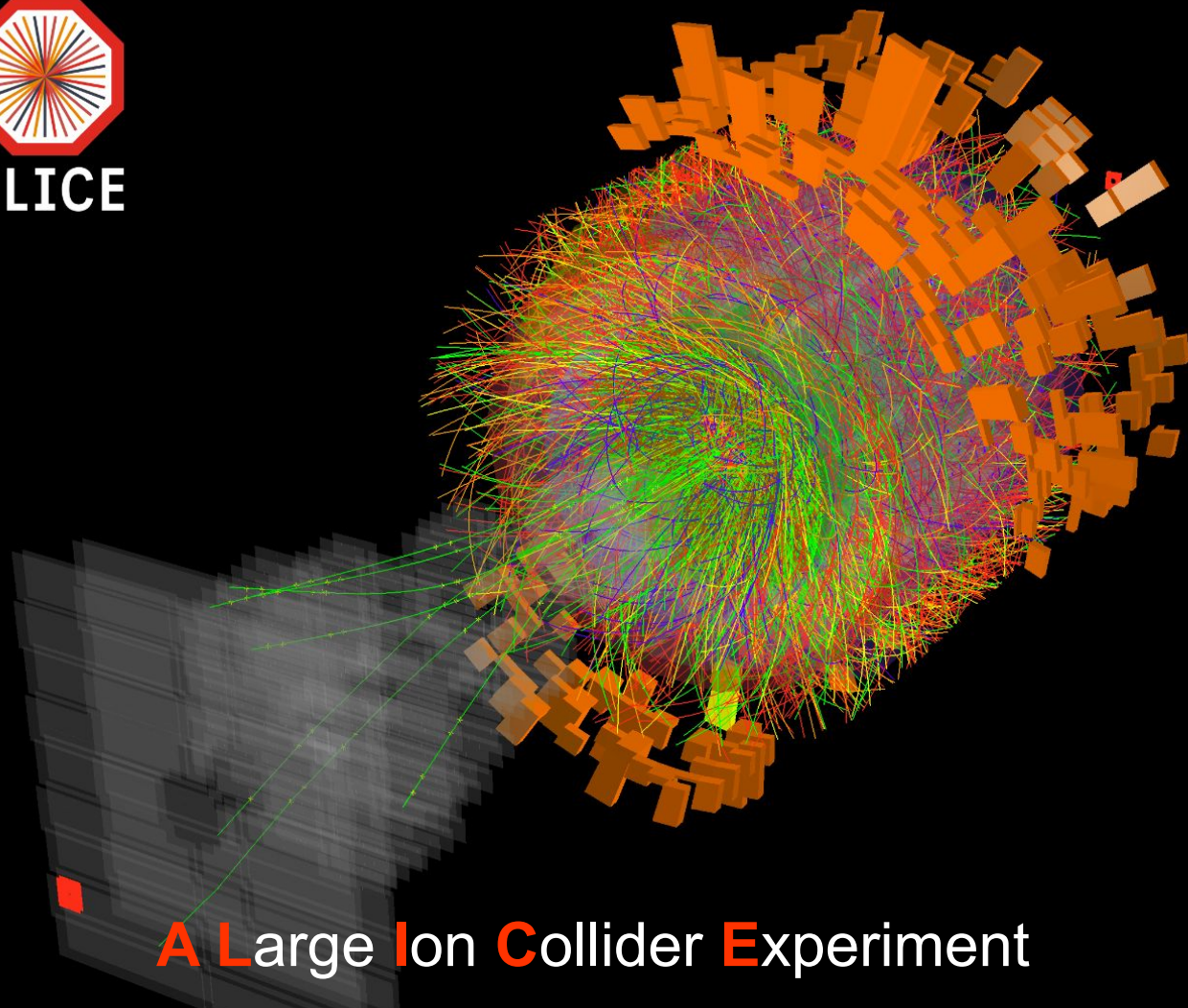


CERN LHC (գործում է 2009 թ)

- Շրջագիծը՝ 27 կմ
- գերհաղորդ. 8 T մագնիսներ
- $\sqrt{s_{NN}}$ pp 0.9–13.6 TeV
- $\sqrt{s_{NN}}$ Pb-Pb 2.76–5.5 TeV
- Run 1: 2010-2013
- Run 2: 2015-2018
- Run 3: 2020-ից
- ALICE, ATLAS, CMS, LHCb



ALICE



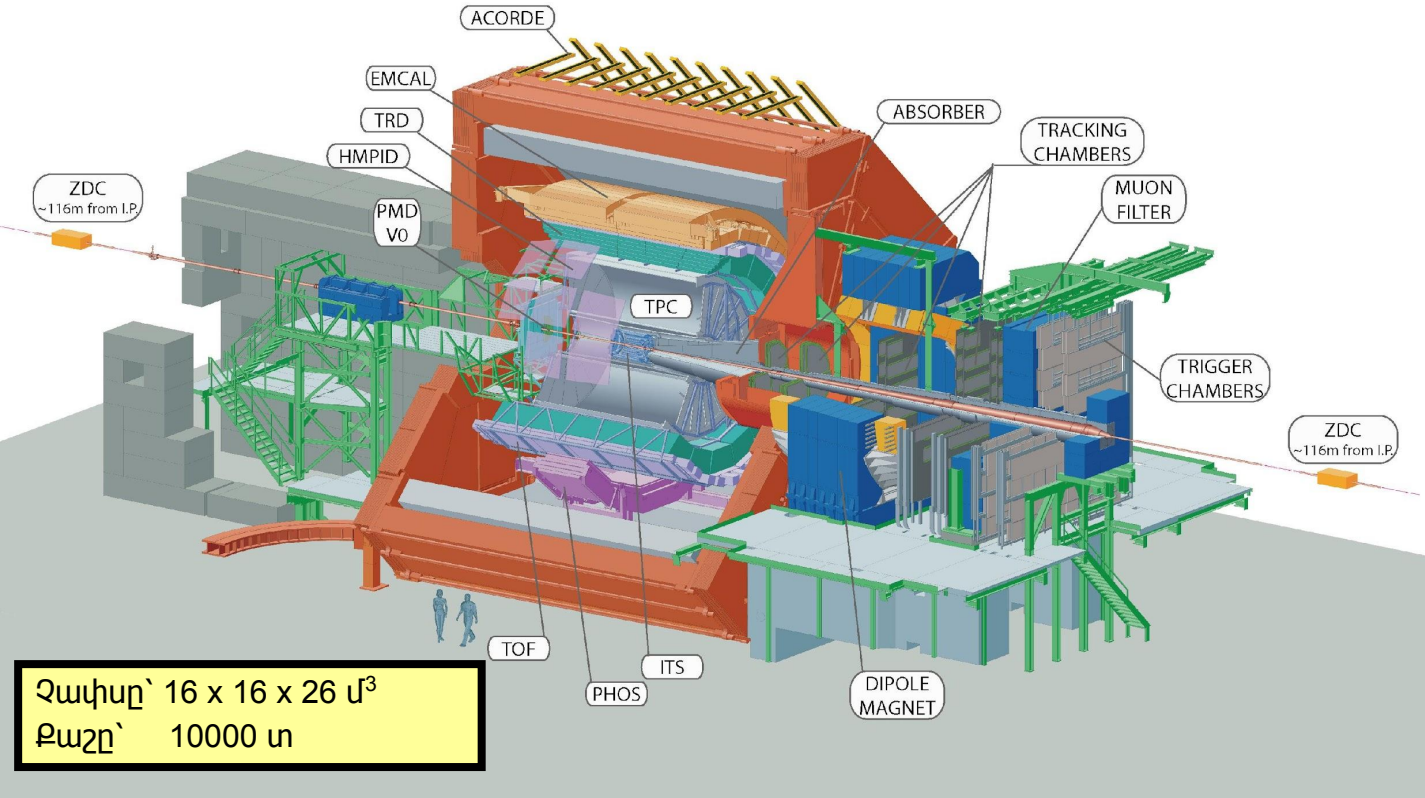
A Large Ion Collider Experiment

Ի՞նչ է կարող չափել ALICE-ը

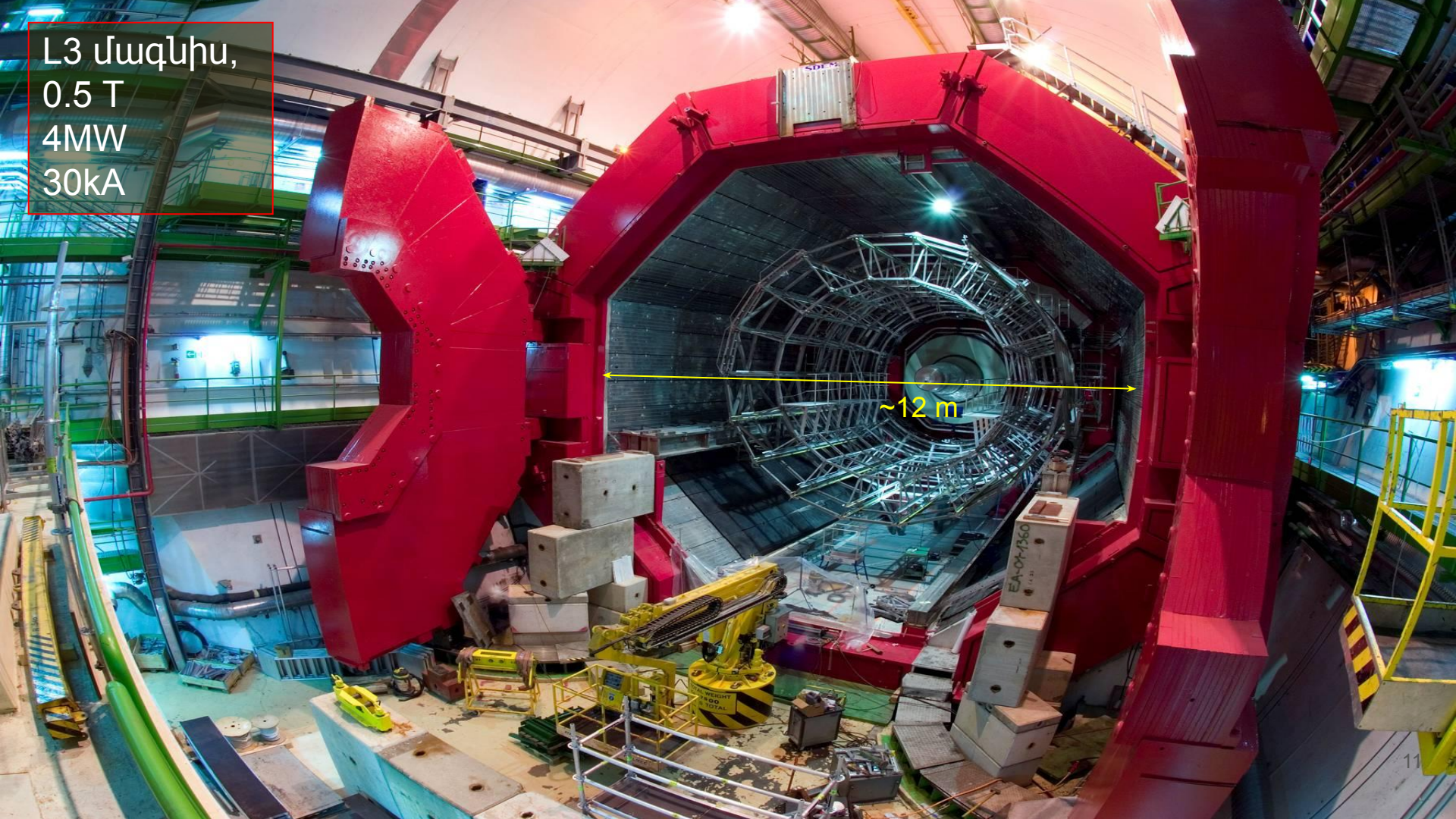
- Լիցքավորված մասնիկների իմպուլսի չափում լայն տիրույթում
- Լիցքավորված մասնիկների նույնականացում
- Ֆոտոնների Էներգիայի չափում
- Մյուոնների նույնականացում և իմպուլսի չափում առաջընթաց արագությունների վրա
- Երկրորդական գազաթների վերակառուցում (տարօրինակ /strange/, հմայիչ /charm/ գեղեցիկ /beauty/ մասնիկների տրոհումներից)
- Բախման կենտրոնականության չափում

ALICE-ը Run 1&2-ում

(PbPb ~1 տրիգգերի kHz հաճախականությամբ)



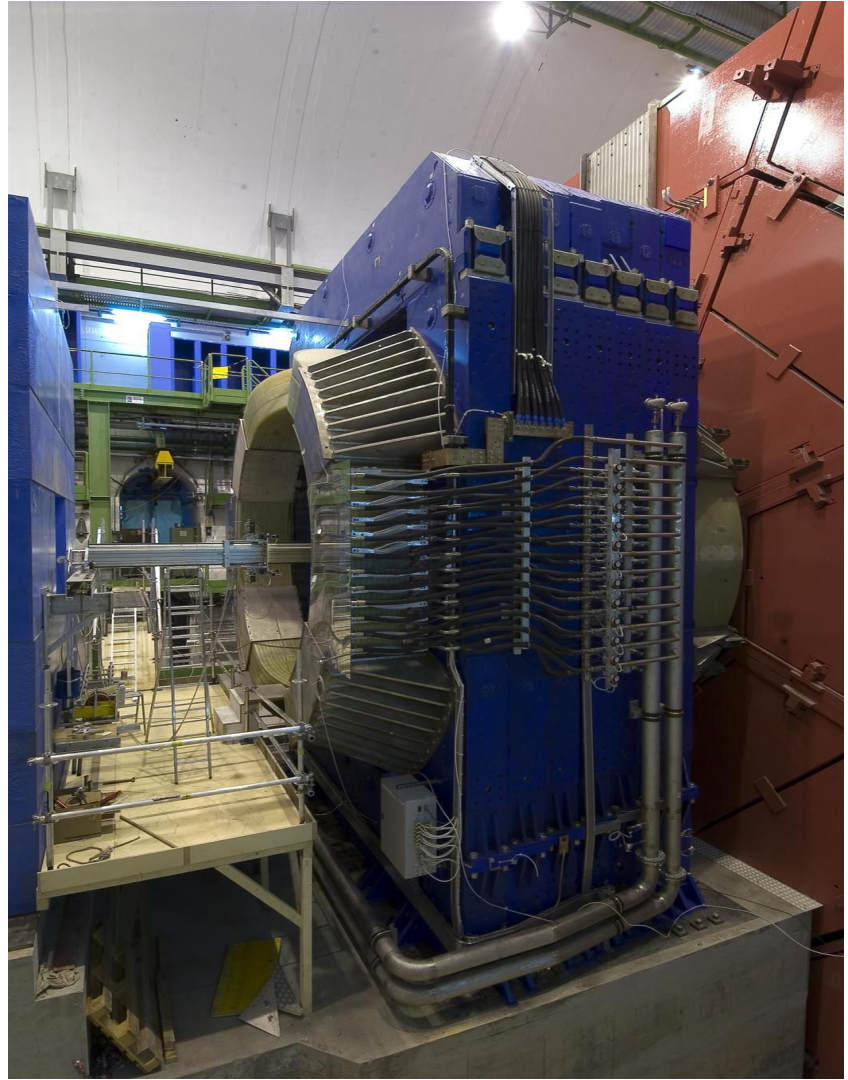
L3 մագնիս,
0.5 T
4MW
30kA



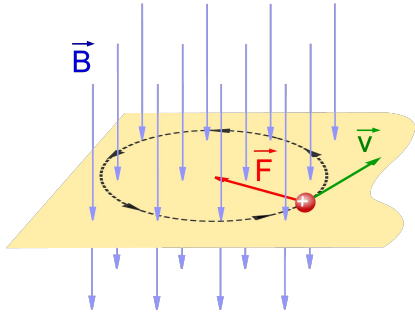
~12 m

Մյուլոնային Սպեկտրոմետրի Դիպոլային Մագնիս

0.7T
4MW
6kA



Իմպուլսի չափումը մագնիսական դաշտում շեղման միջոցով



Լորենցի ուժ
 $\vec{F} = q[\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}]$



$$p = 0.3qBR$$

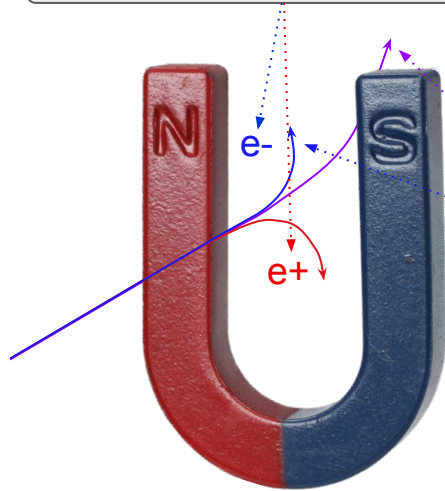
p. մագնիսական դաշտին իմպուլսի բաղադրիչը [GeV/c]

B: մագնիսական դաշտը (Tesla)

q: լիցքի նշանը

R: կորուսյան շառավիղը [մ]

Լիցքի նշանը որոշվում է շեղման ուղղությունից



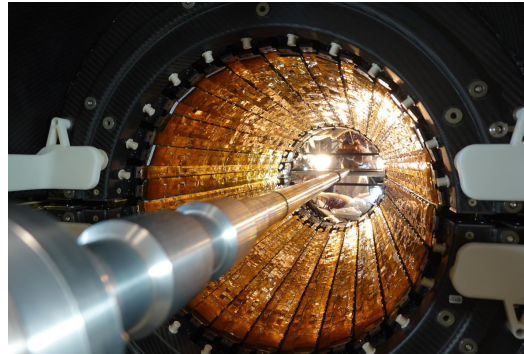
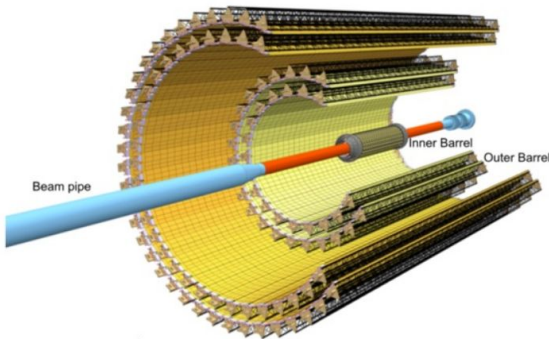
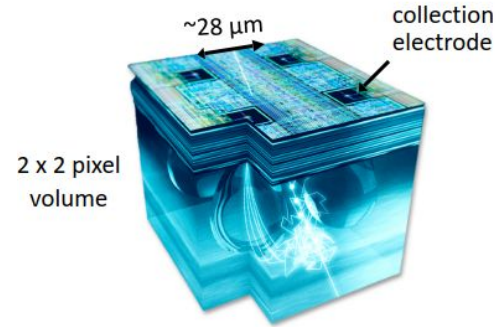
Իմպուլսը որոշվում է շեղման կորուսյուն շառավղից

Մեծ իմպուլս

Փոքր իմպուլս

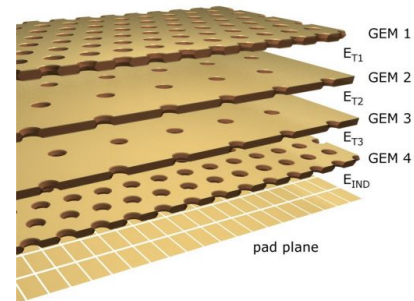
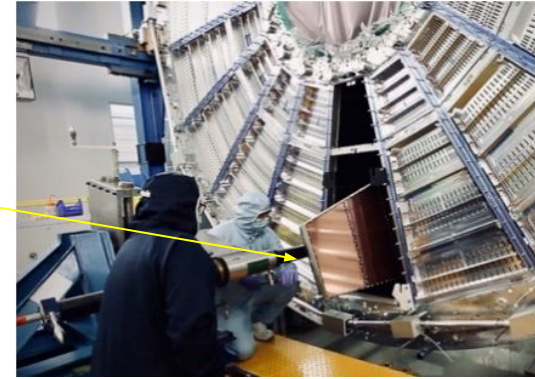
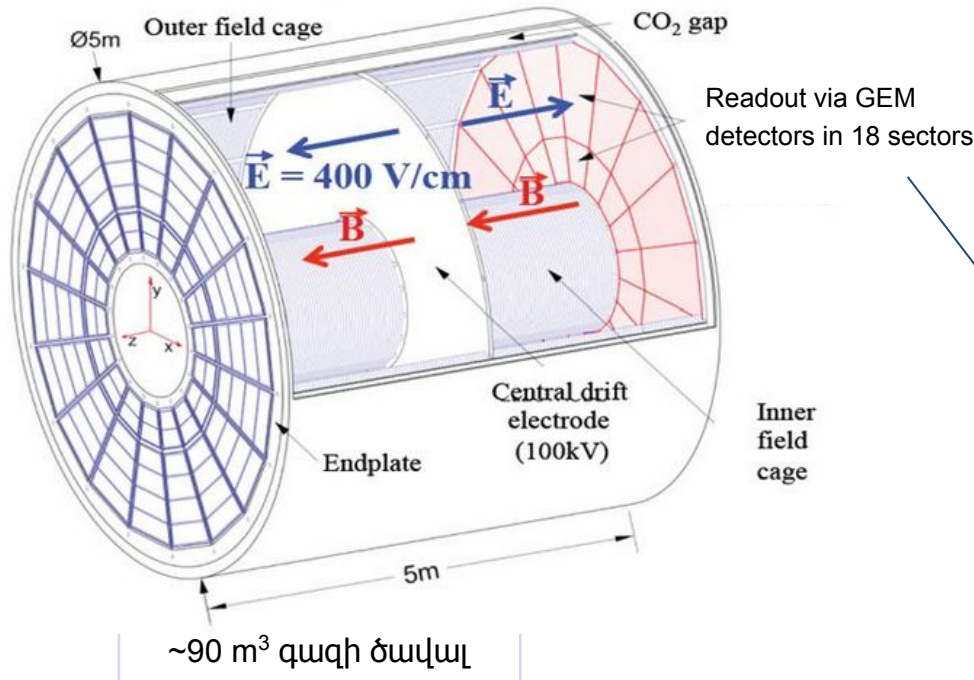
Ներքին տրեկինգի համակարգ, ITS2 (Inner Tracking System)

- 7 շերտ, պարունակում են 24120 ALPIDE մոնոլիտ ակտիվ պիքսել սենսորներով (MAPS), ընդհանուր մակերեսը $\sim 10 \text{ m}^2$
- $\sim 12,5 \text{ G}$ պիքսել, յուրաքանչյուրը կատարում է ազդանշանի ուժեղացում, ձևավորում, տարբերակում և բուժերացում
- Բարձր ($>99\%$) եֆֆեկտիվություն և շատ ցածր աղմուկ ($\sim 10^{-10}$ /պիքսել/դեկաբ)
- Բարձր ճառագայթային հանդուրժողականություն ($> 270 \text{ kRad}$ ընդհանուր դոզա)
- Նյութի ցածր բյուջե՝ $0,35\%$ -ից մինչև $1,15\% X_0$, կախված շերտից
- Տվյալների փոխանցում $\sim 200 \text{ kHz}$ հաճախականությամբ քր բախումների ժամանակ $<10 \text{ }\mu\text{m}$ լուծողականություն



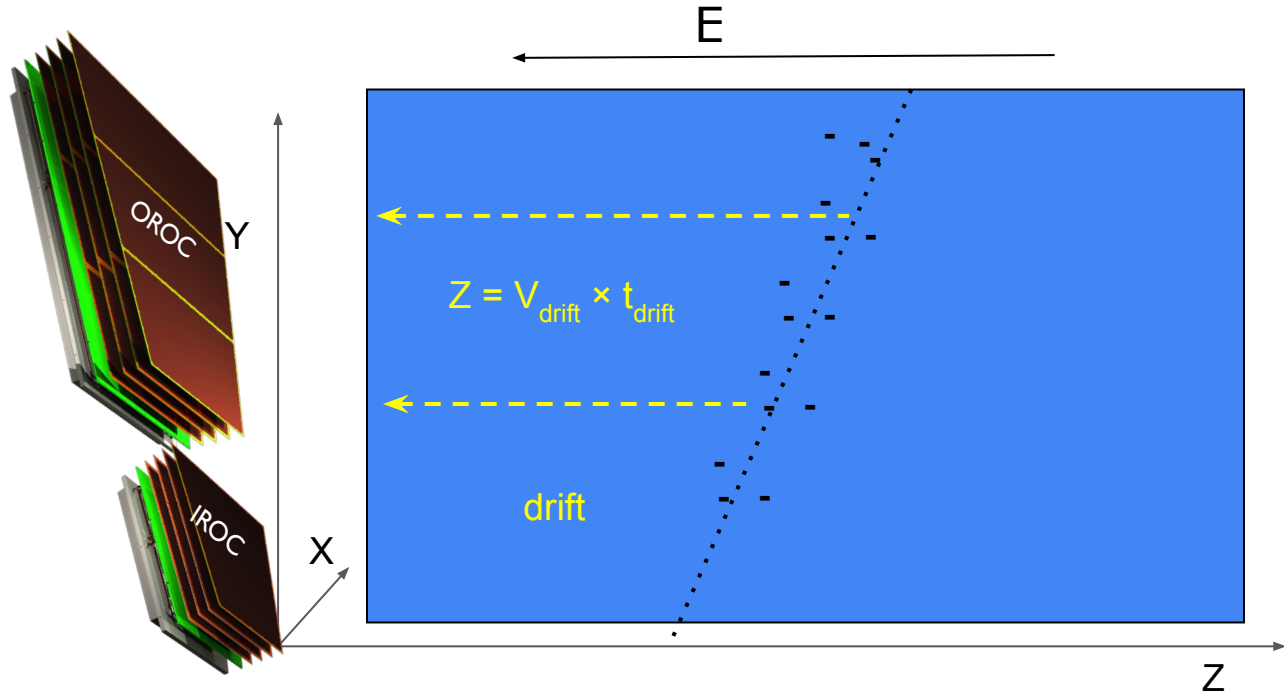
Ժամանակի Պրոյեկցիայի Խցիկ, TPC

(Time Projection Chamber)

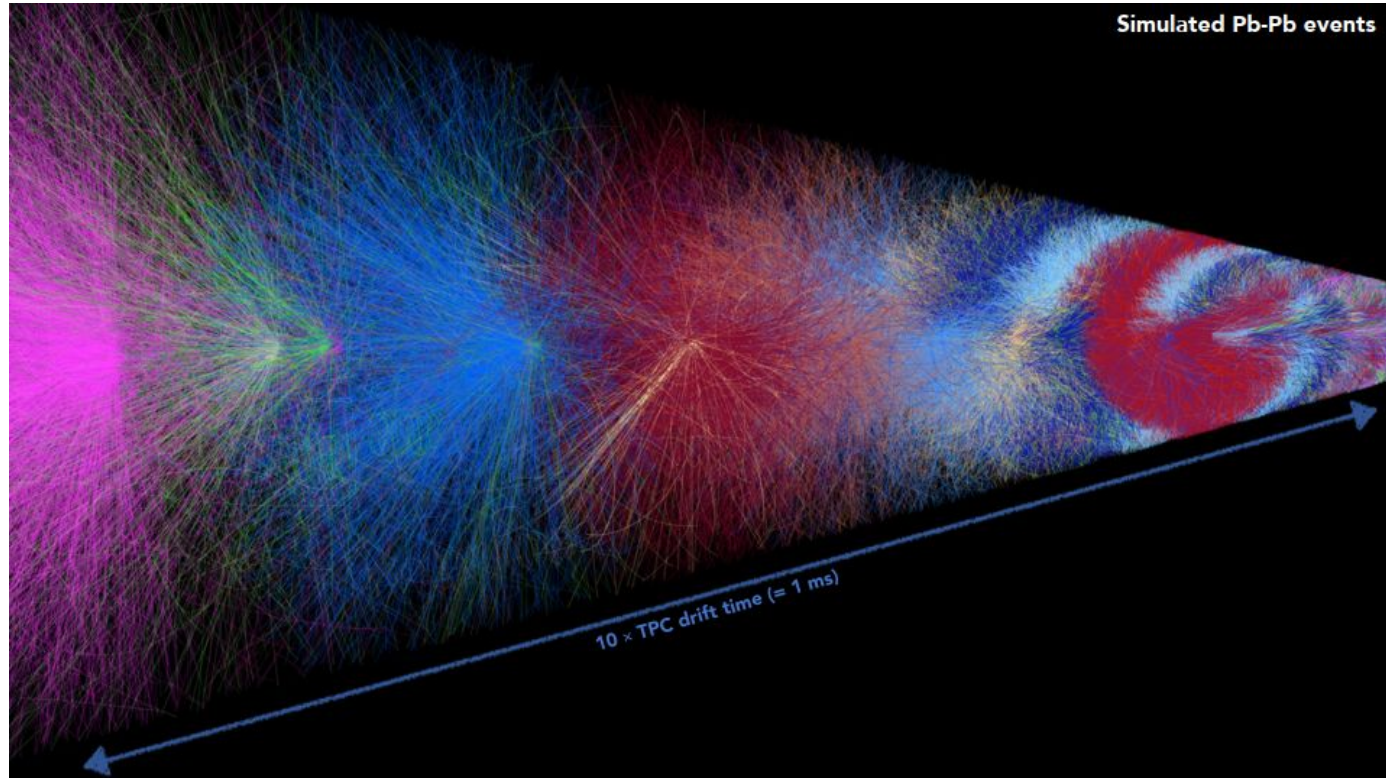


TPC՝ գործողության սկզբունքը

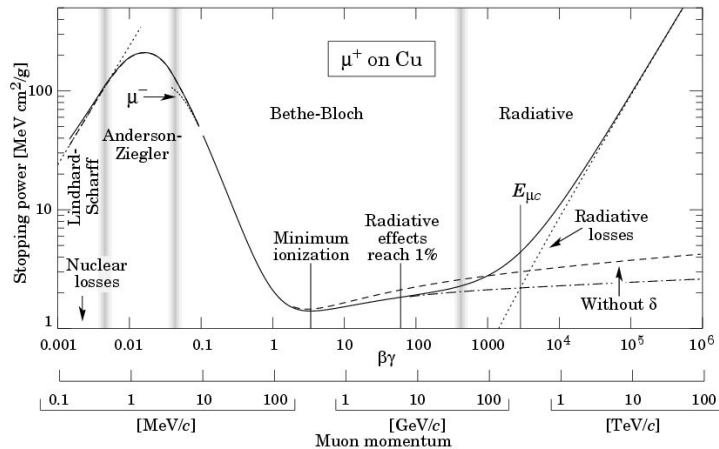
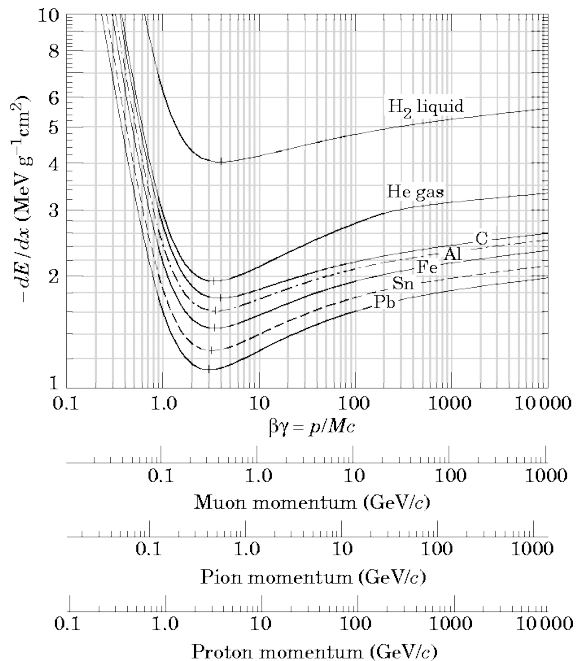
- X, Y կոորդինատներ չափվում են անմիջապես իոնիզացման կետից դեպի կարդող հարթությունն դրեյֆող էլեկտրոնների դիտումով
- Z կոորդինատը (փնջի երկայնքով) գնահատվում է էլեկտրոնների դրեյֆի ժամանակից (գրանցման և փոխազդեցության ջամանակների տարբերությունից)



Ճարունակական տվյալների հավաքում եւ տրեկինգ TPC-ում



Մասնիկների նույնականացում (PID) էներգիայի կորստից TPC-ում

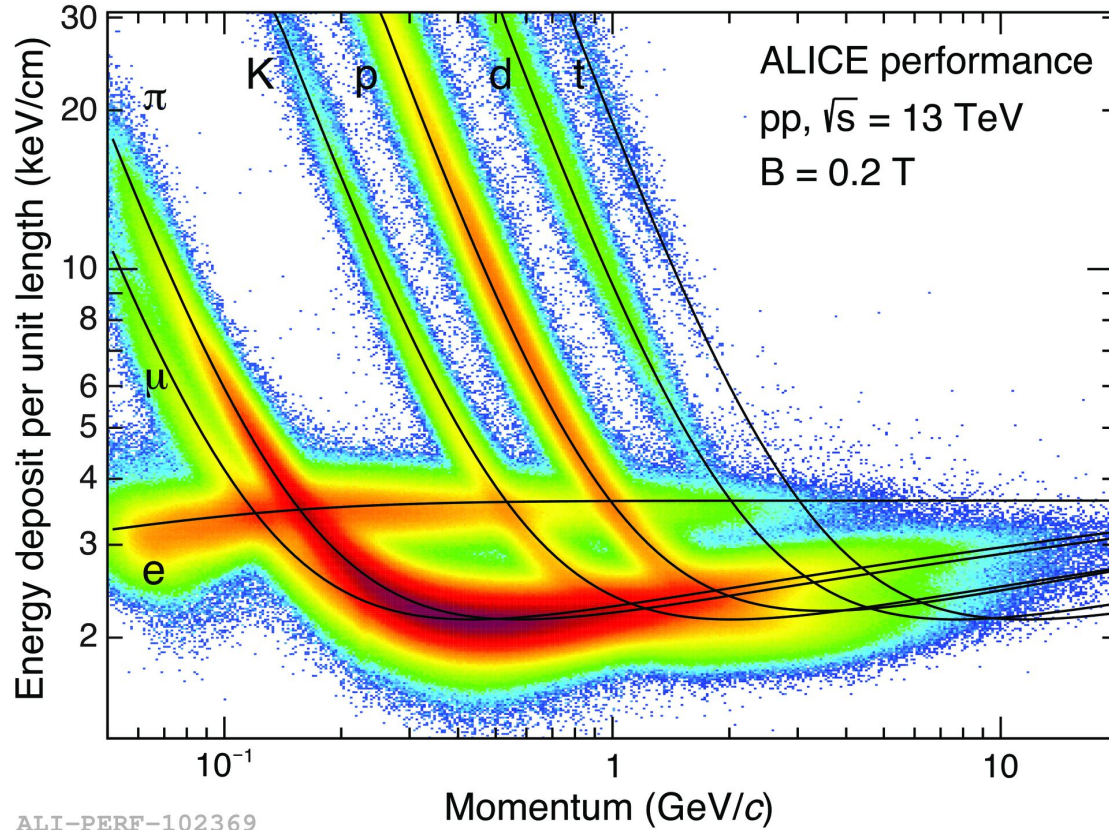


Միջին էներգիայի կորուստը ըստ Բեթեի և Բլոխի

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A \beta^2} \left[\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

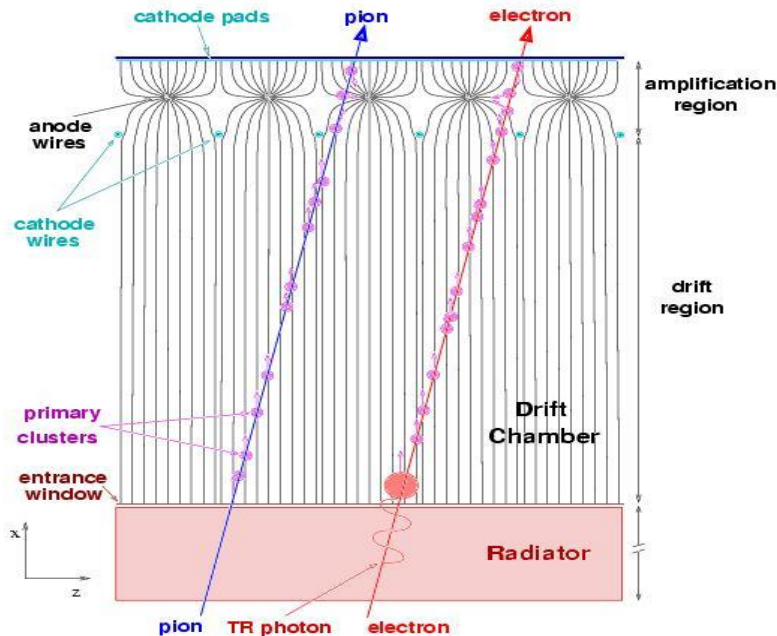
- K $4\pi N_A r_e^2 m_e c^2$
- Z Atomic number of absorber
- A Atomic mass of absorber
- m_e Mass of an electron
- r_e Classical radius of an electron
- I Mean excitation energy
- T_{max} Maximum Kinetic energy which can be imparted to a free electron in one collision

Մասնիկների նույնականացում (PID) Էներգիայի կորստից TPC-ում



Անցումային ճառագայթման դետեկտոր (TRD)

(Transition Radiation Detector)



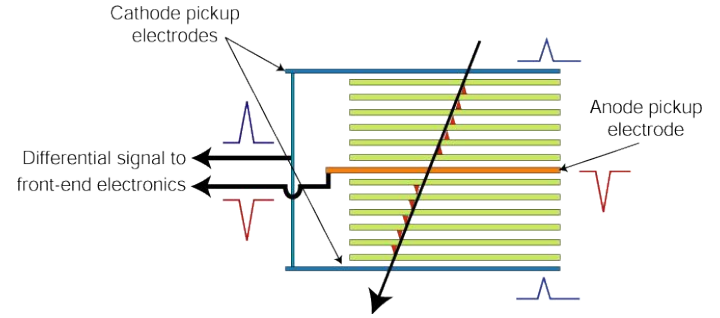
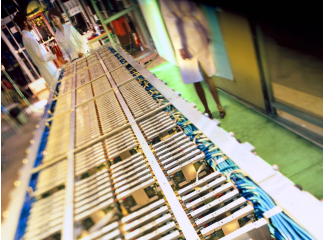
Ռելատիվիստիկ էլեկտրոնների բաժանումը հադրոններից

- Երբ ռելատիվիստիկ ($\gamma \gg 1$) մասնիկը անցնում է անհամասեռ նյութի միջով, այն լույս է արձակում
- Տեսանելի սպեկտրում ինտենսիվությունը $\sim \log(\gamma)$ և $\sim \gamma$ ռենտգենյան սպեկտրի համար
- Ցածր զանգվածի պատճառով էլեկտրոնը մեր հետաքրքրության իմպուլսների տիրույթում (>50 MeV) միշտ ռելատիվիստիկ է, մինչդեռ հադրոնները՝ ոչ:
Օրինակ, 1 GeV-ի դեպքում՝
Էլեկտրոն ($m=0.5$ MeV/c) $\rightarrow \gamma \sim 2000$
Պրոն ($m=140$ MeV/c) $\rightarrow \gamma \sim 6.9$
- TR ֆոտոններ արտադրվում են ռադիատորում և կլանվում են դրեյֆային խցիկում՝ ստեղծելով լրացուցիչ իոնիզացման էլեկտրոններ
- Դրանց դիտման մեթոդը նման է TPC-ին

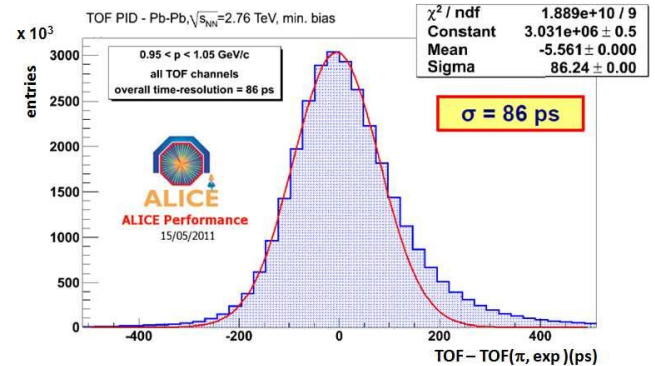
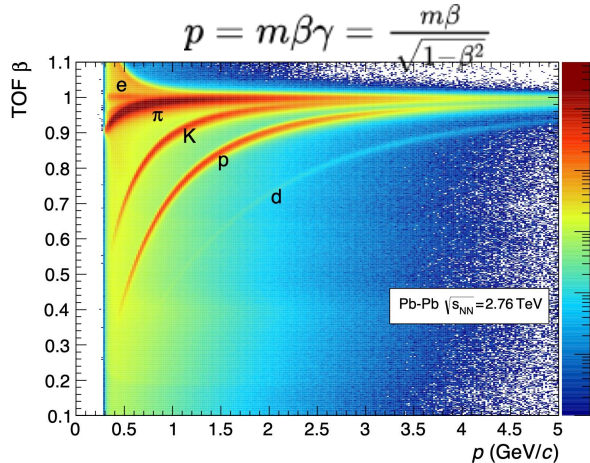
Թռիչքի ժամանակի Դետեկտոր, TOF

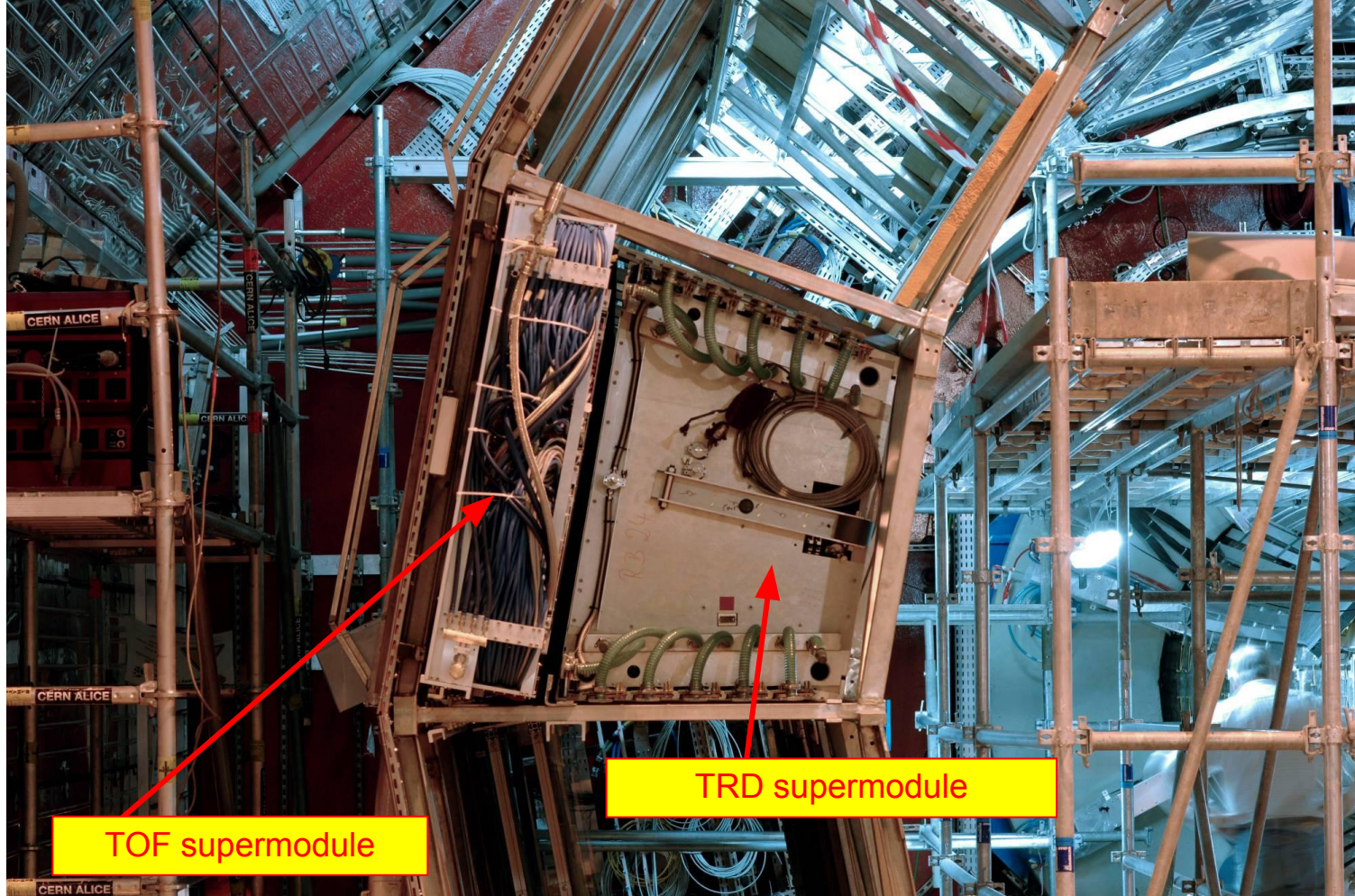
(Time of Flight Detector)

Բազմաշերտ բարձր դիմադրության թիթեղների խցիկ
(Multigap Resistive Plate Chambers)



Մասնիկի բախման գազաթից մինչև դիտման կետ հեռավորության (~4 մ) թռիչքի ժամանակի չափումը թույլ է տալիս որոշել դրա արագությունը (~13 նս լույսի արագությամբ շարժվող մասնիկի համար)





TOF supermodule

TRD supermodule

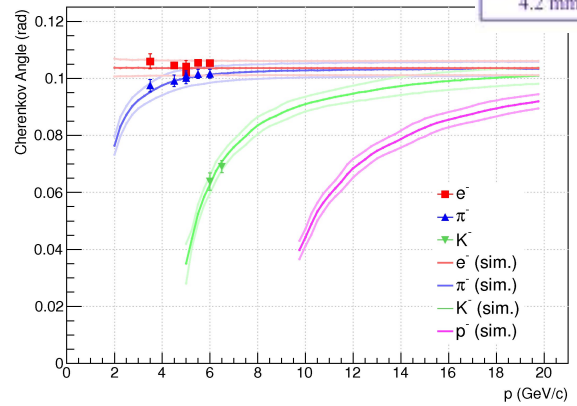
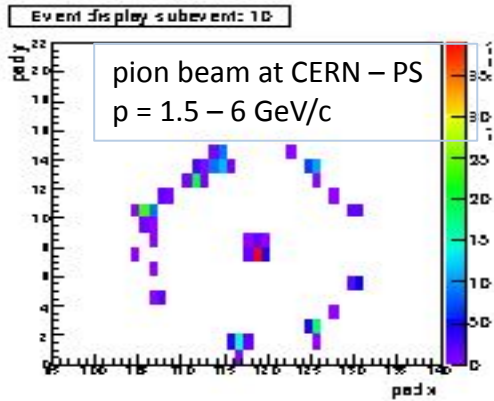
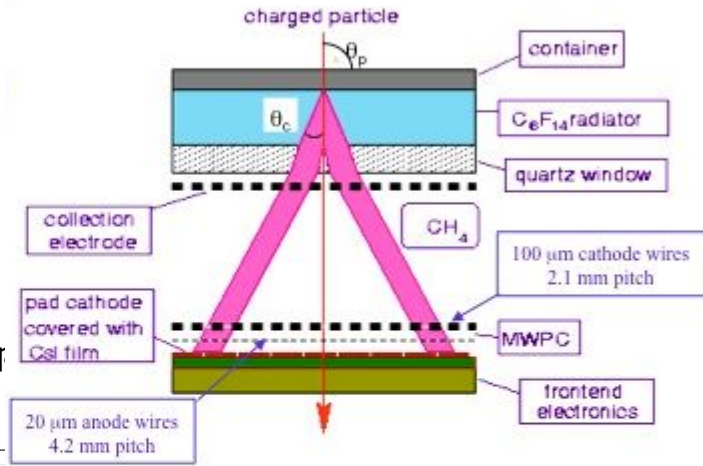
Բարձր Իմպուլսով Մասնիկների Նույնականացման Դետեկտոր, HMPID

(High Momentum Particle Identification Detector)

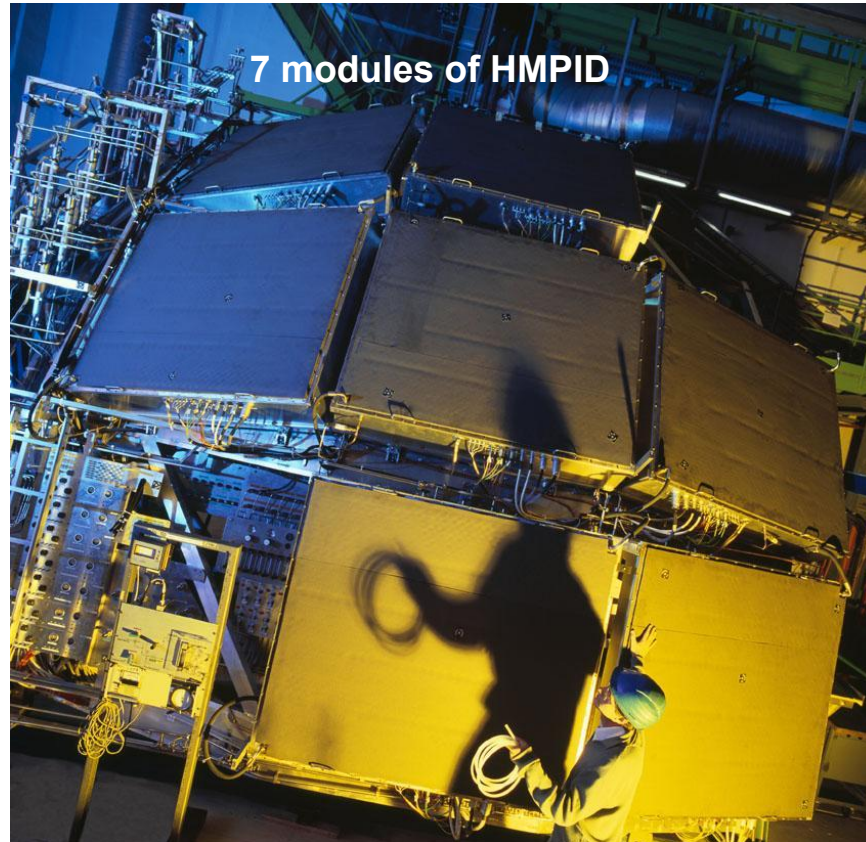
- Ջիմնված է Չերենկովյան ֆոտոնների դիտման վրա՝ n բեկման ինդեքսով միջավայրում լույսի արագությանից ավելի բարձր β արագությամբ շարժվող մասնիկները լույս են ճառագայթում θ անկյունով կոնում՝

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta}$$

- HMPID-ը չափում է այդ անկյունը (հետևաբար՝ մասնիկների արագությունը) «Չերենկովյան օղակի» շառավղից՝ ֆոտոնների պատկեր կոնի պրոյեկցիայից թելաին խցիկի (MWPC) հարթուր:

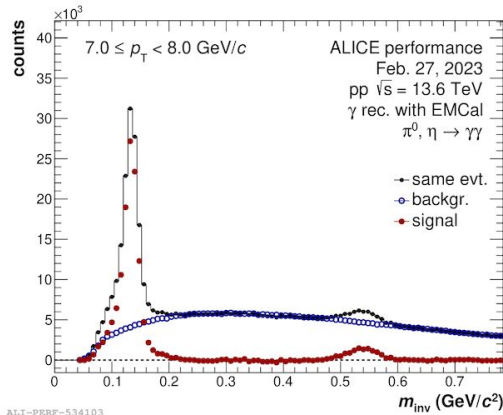
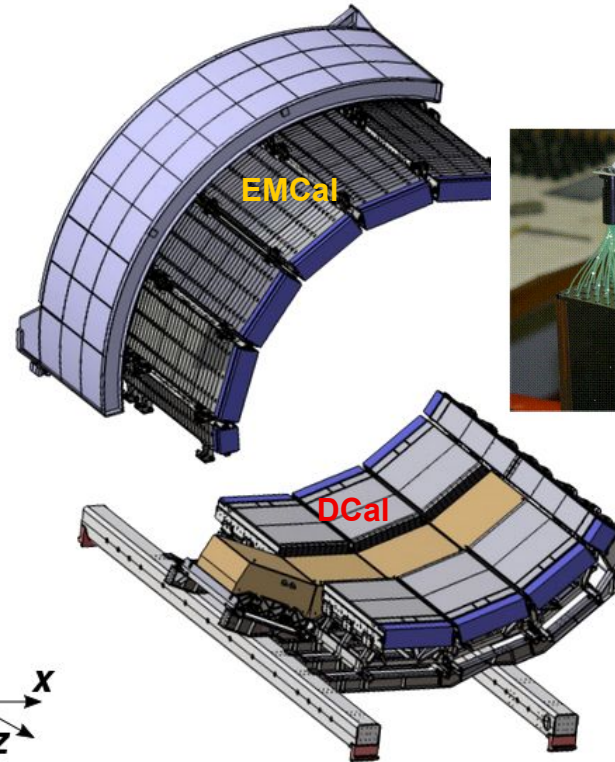


Բարձր իմպուլսով Մասնիկների Նույնականացման Դետեկտոր, HMPID (High Momentum Particle Identification Detector)



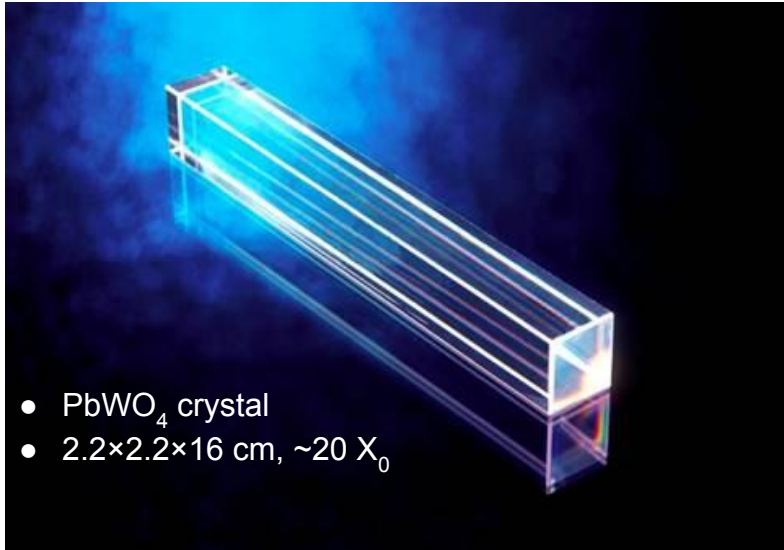
Էլեկտրամագնիսական Կալորիմետր, EMCAL (Electromagnetic Calorimeter)

- Չափում է բարձր էներգիայով ֆոտոններ, էլեկտրոններ, չեզոք պիոններ և մասնիկների հոսքեր (ջեթ)
- Շաշիկ-տիպի նմուշառող կալորիմետր՝ բախկացած է 12288 (EMCal) + 5376 (DCal) աշտարակներից՝ կապարից և պլաստիկ ցինտիլյատոր շերտերից
- Էլեկտրամագնիսական հեղեղներից առաջացած լույսը հավաքվում է ալիքի երկարությունը փոխող մանրաթելերի միջոցով և կարդացվում հեղեղային ֆոտոդիոդներով (APD)



Ֆոտոնային Սպեկտրոմետր, PHOS

(Photon Spectrometer)

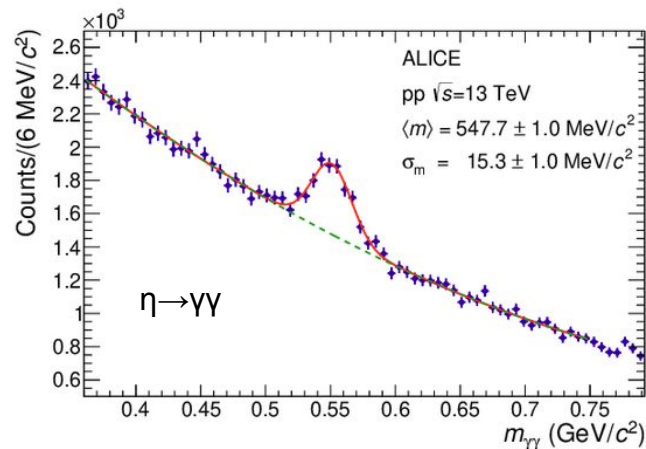
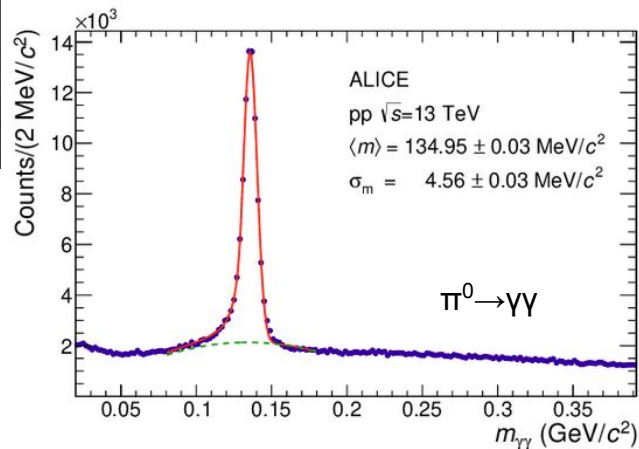
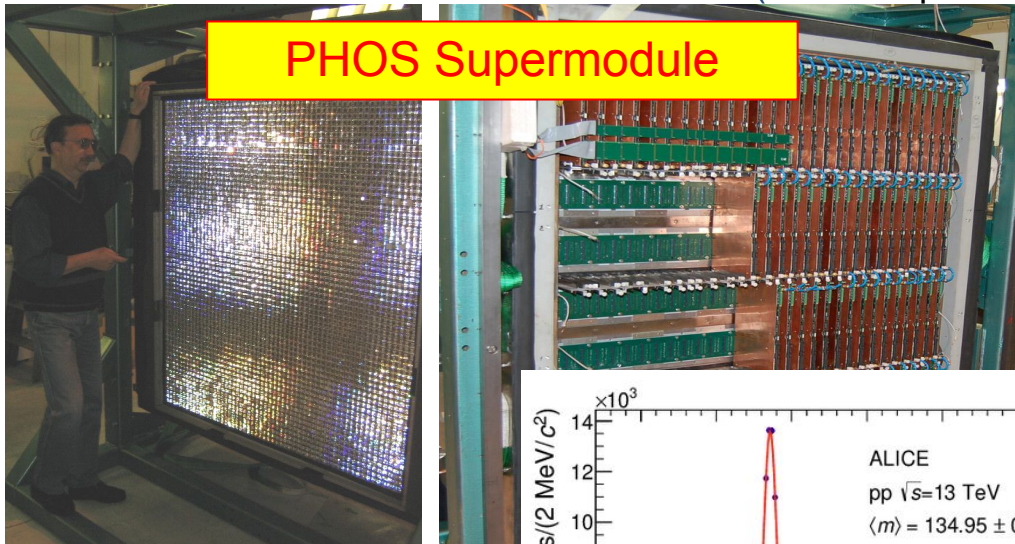


- PbWO_4 crystal
- $2.2 \times 2.2 \times 16$ cm, $\sim 20 X_0$

- Ֆոտոնները վերածվում են էլեկտրոն-պոզիտրոն զույգերի՝ բյուրեղներում (PbWO_4) էլեկտրամագնիսական հեղեղներ առաջացնելով
- Լիցքավորված մասնիկները զրգռում են բյուրեղների ատոմները, ինչը հանգեցնում է ուլտրամանուշակագույն լույսի արտանետմանը (ցինտիլացիա):
- Լույսը հավաքում են հեղեղային ֆոտոդիոդները:
- Նաև լիցքավորված մասնիկները կարող են ներդնել PHOS-ում չափված էներգիայի մեջ: Նրանց ներդրումը հաշվի առնելու համար առանձին լիցքավորված մասնիկների վետո (Charged Particle Veto, CPV) դետեկտոր (տելային խցիկ) և տեղադրված է PHOS-ի դիմաց:

Ֆոտոնային Սպեկտրոմետր, PHOS (Photon Spectrometer)

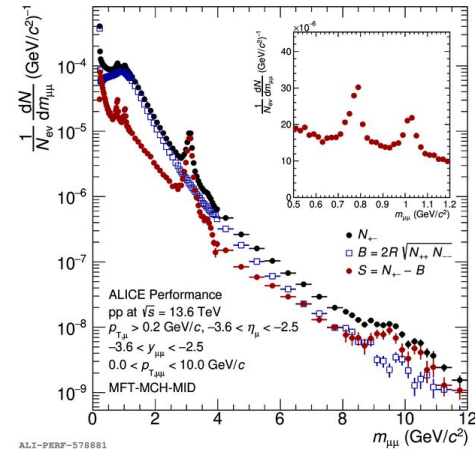
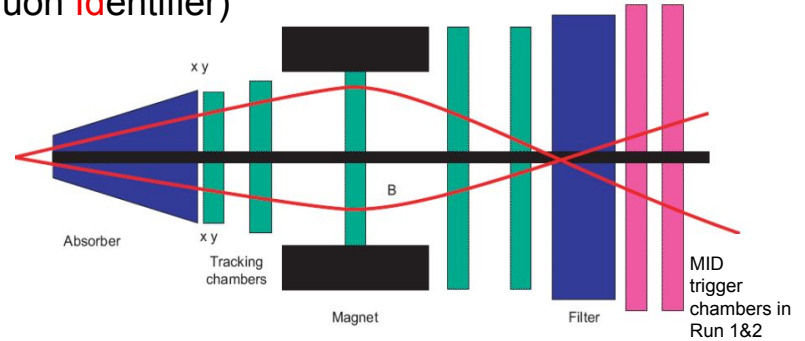
PHOS Supermodule



Մյուոնային սպեկտրոմետր (MS) և մյուոնների նույնականացման դետեկտոր (MID)

(**M**uon **S**pectrometer and **M**uon **I**dentifier)

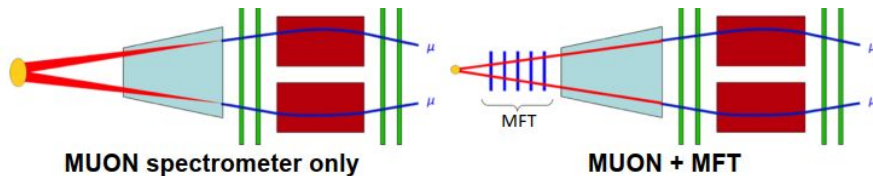
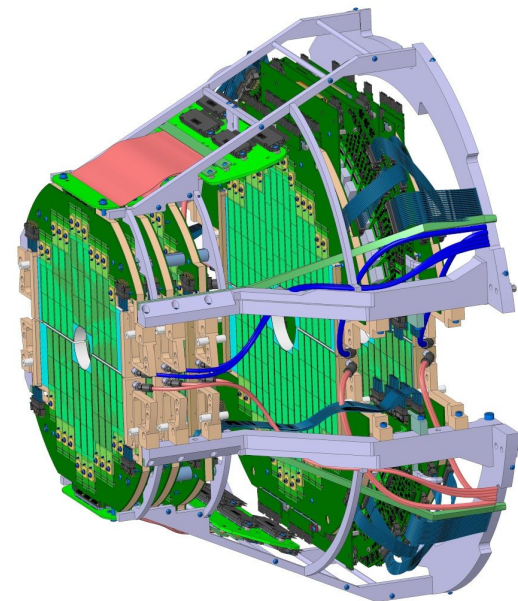
- Հադրոնների կլանիչ (C/բետոն), մյուոններից բացի բոլոր լիցքավորված մասնիկները ճնշելու համար (և կանխելու π և K -ի մյուոնային տրոհումը)
- 5 տրեկինգային կայան (յուրաքանչյուրը բախկացած է 2 թելային խցիկների հարթությունից 2D չափումներ ապահովելու համար) դիպոլային մագնիսից առաջ, ներսում և հետո
- Երկաթ պատ (ևս մի հադրոնային կլանիչ)՝ մնացած հադրոնները մաքրելու համար
- Մյուոնների նույնականացման դետեկտոր (RPC-ների երկու հարթություն), Run 3-ում օգտագործվում է մյուոնները ընտրելու համար, Run 1 & 2-ում օգտագործվում էր օնլայն տրիգգեր ապահովելու համար



ALI-CONF-578881

Առաջալին մյուոնների տրեկեր, MFT (Muon Forward Tracker)

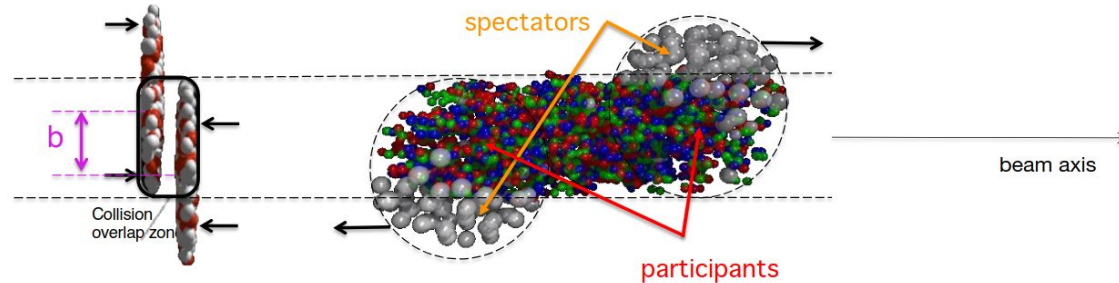
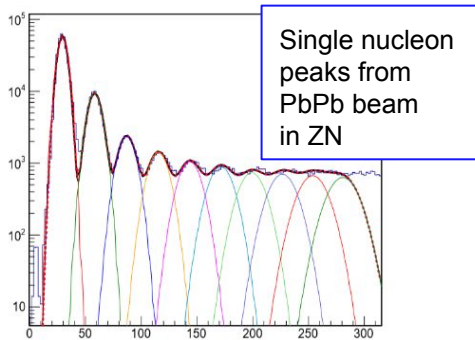
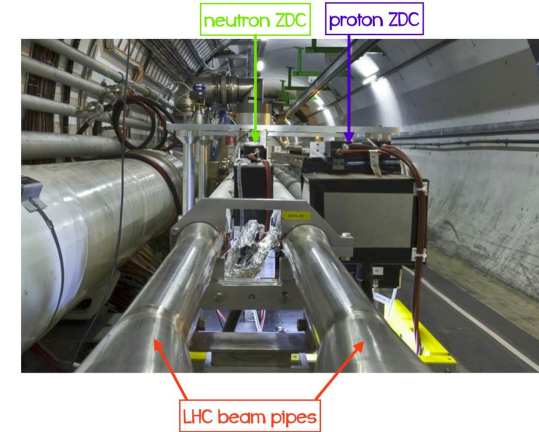
- Առաջ շարժվող (դեպի Մյուոնային սպեկտրոմետր, MS) մասնիկների սիլիկոնային պիկսելային դետեկտոր
- 5 շերտ՝ կազմված 920 ALPIDE չիպերից (նույնը, ինչ ITS-ում)
- Տեղադրված է փոխազդեցության կետի և -ի կլանիչի միջև՝ չափում է տրեկերը նախքան դրանք կմտնեն կլանիչի մեջ
- Այս տրեկերը համապատասխանեցնելով MS-ում տեսած մյուոնների հետ՝ թույլ է տալիս խուսափել սխալներից, որոնք առաջանում են կլանիչում բազմակի Կուլոնյան ցրման հետևանքով (որը դիմյուոնների ցածր զանգվածների հատվածում զանգվածի լուծողականության հիմնական խանգարող գործոնն է)
- ALPIDE սենսորների գերազանց տարածական լուծողականությունը թույլ է տալիս ճշգրիտ էքստրապոլյացիա կատարել տրեկերը փոխազդեցության զագաթի հետ կապելու և դրանիս հեռավորությունը չափելու համար



Զրոյական Անկյան Կալորիմետր, ZDC

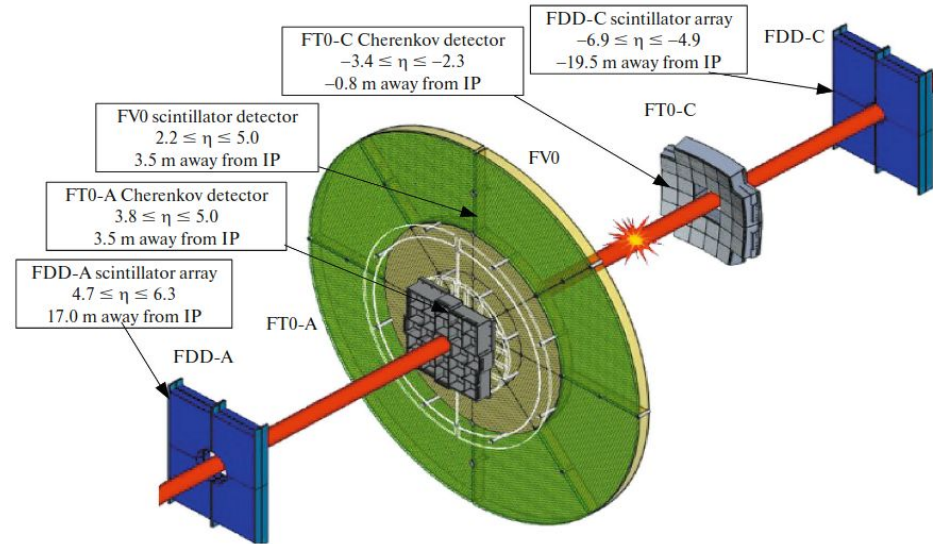
(Zero Degree Calorimeters)

- Երկու նույնատիպ հադրոնային կալորիմետրերի հավաքածուներ՝ փոխազդեցության կետի երկու կողմերում (112.5 մ հեռավորության վրա):
- Յուրաքանչյուր ZDC-ն բաղկացած է երկու դետեկտորներից՝ "դիտորդ" (մասնիկներ որոնք չեն մասնակցում բախմանը այլ շարունակում են բախվող փնջերի ուղղությամբ շարժումը) նեյտրոնների (ZN) և պրոտոնների ու լիցքավորված մասնիկների (ZP) համար
- Աշխատում է՝ հավաքելով Չերենկովյան լույսը քվարցային մանրաթելերից, որոնք տեղադրված են ուֆրամե (ZN) և արույրե (ZP) կլանիչներում:
- Դիտորդների էներգիան չափելով՝ հնարավոր է հաշվել մասնակցող նուկլոնների թիվը և ֆեյնմենուլոգիական մոդելների (օր.՝ Գլաուբեր) միջոցով որոշել բախման "հարվածային պարամետր" b -ն:

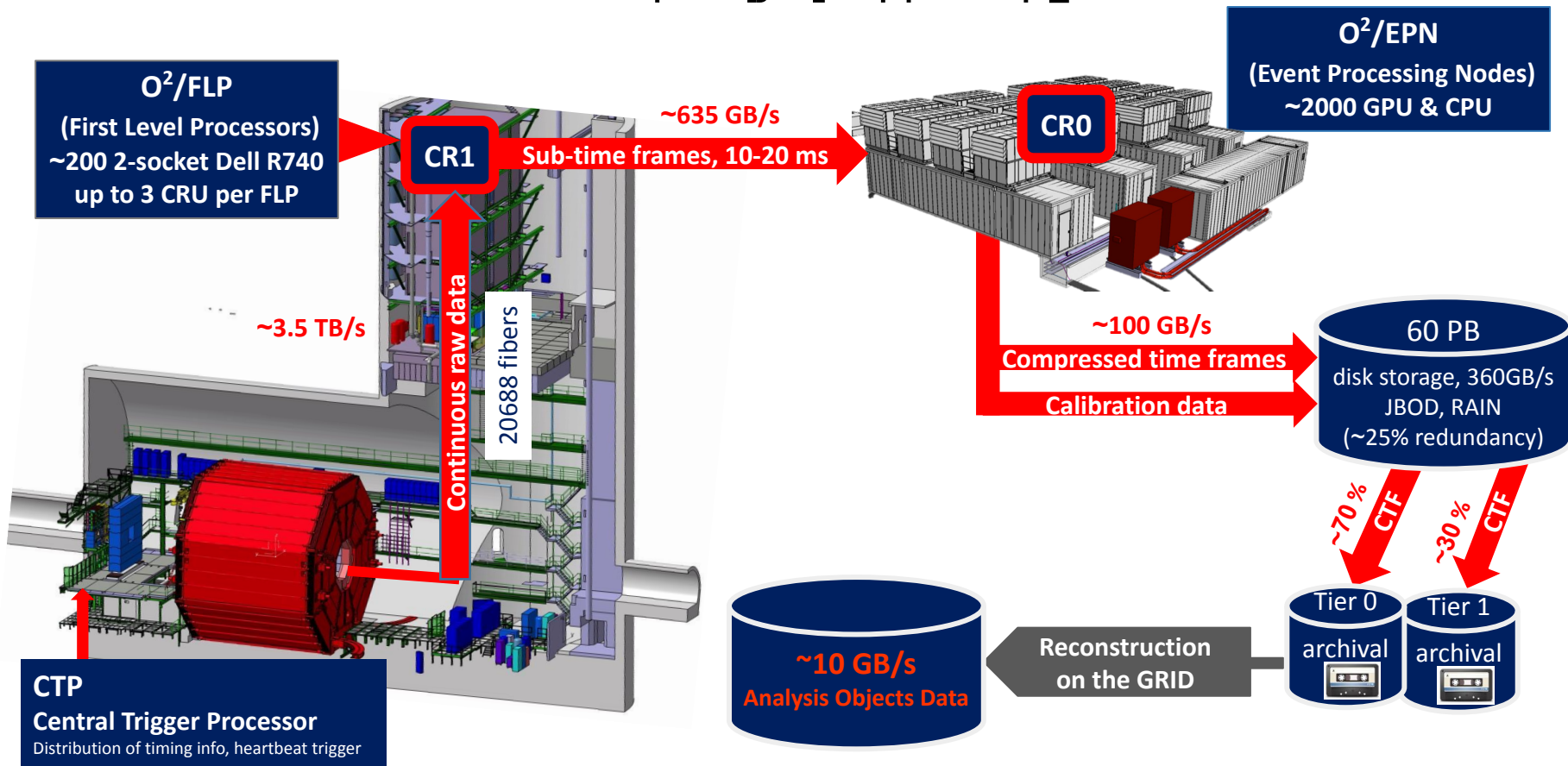


Առաջալին Դետեկտորներ, FT0, FV0, FDD

- FT0: երկու Չերենկովյան դետեկտորներ փոխազդեցության կետի երկու կողմերում
 - Ապահովում է ճշգրիտ բախման ժամանակի չապումը՝ ~50 ps լուծողականությամբ (օգտագործվում է TOF և TPC տվյալների վերականգնման համար)
 - Տրիգգեր (բախման կենտրոնականությունից կախված)՝ տրիգգեր պահանջող դետեկտորների համար
 - Օգտագործվում է պուլս-գազ փոխազդեցությունը մերժելու համար
- FV0: մեծ ծածկույթով հատվածավորված ցինտիլյատոր դետեկտոր
 - Ապահովում է տրիգգեր, չափում է առաջալին մասնիկներու քանակը
- FDD: երկու շատ առաջալին ցինտիլյատոր դետեկտորներ
 - Դիֆրակցիոն բախումների կտրվածքի չափումների և ուլտրա-պերիֆերիկ փոխազդեցությունները ընտրելու համար

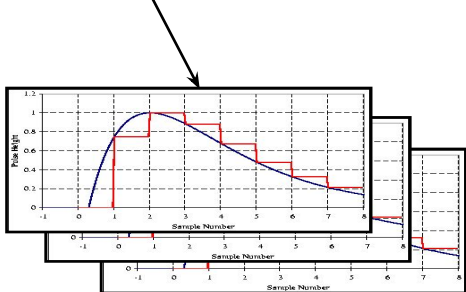
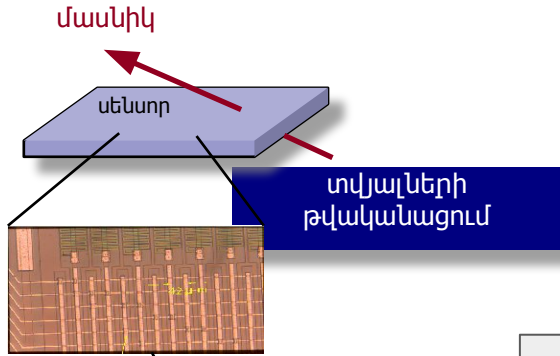


ALICE-ի տվյալների հոսքը

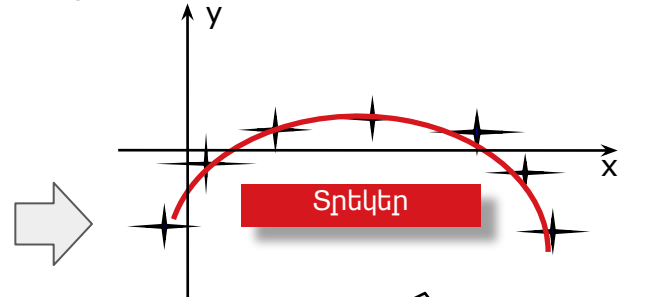
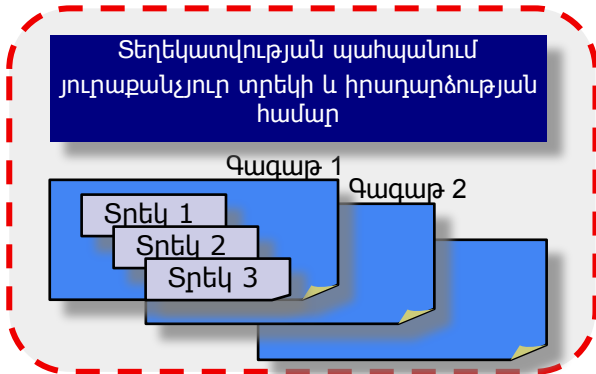
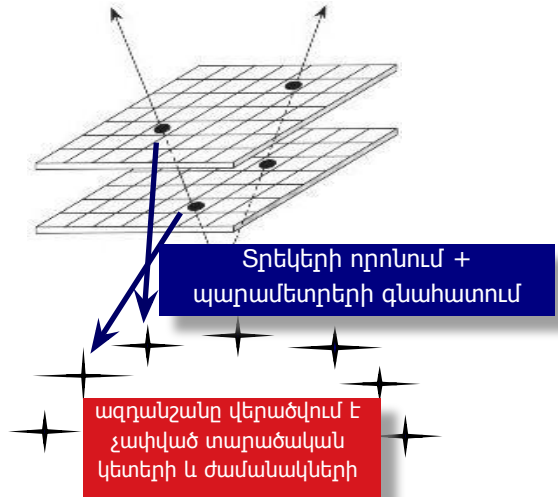


մոտ 350 անգամ սկզբնական տվյալների սեղմում!

Տվյալների մշակում և սեղմում



անալոգային ազդանշան



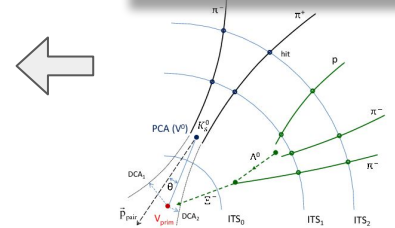
dE/dx , էներգիայի կորուստ մասնիկի տունսկանացում (PID)

Մագնիսական դաշտ B:

$$\vec{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$$

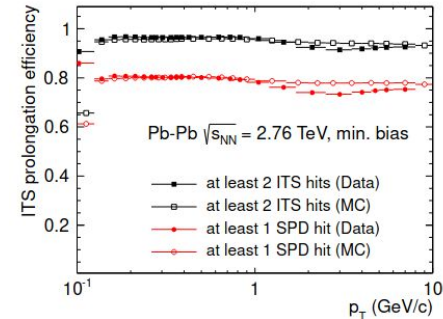
Տրեկի իմպուլս

Սկզբնական և երկրորդական գագաթներ

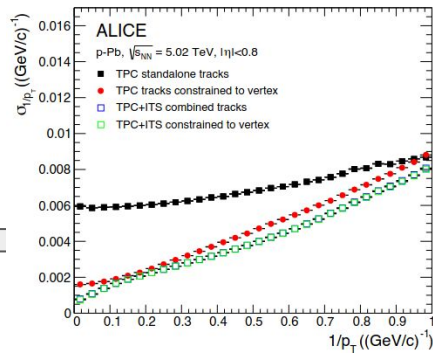


Տվյալների վերակառուցման ցուցանիշներ

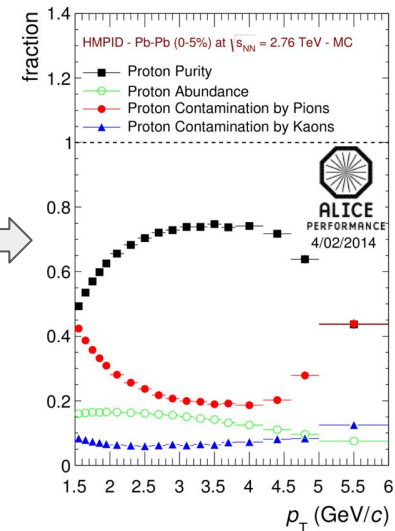
- Արդյունավետություն
վերակառուցված մասնիկների թիվը
= $\frac{\text{վերակառուցված մասնիկների թիվը}}{\text{բոլոր մասնիկների թիվը}}$



- Լուծողականություն
չափված արժեք – ճշգրիտ արժեք
= $\frac{\text{չափված արժեք}}{\text{ճշգրիտ արժեք}}$



- Կեղծ մասնիկների պարունակությունը
= սխալ կառուցված կամ նույնականացված տրեկերի տոկոսը

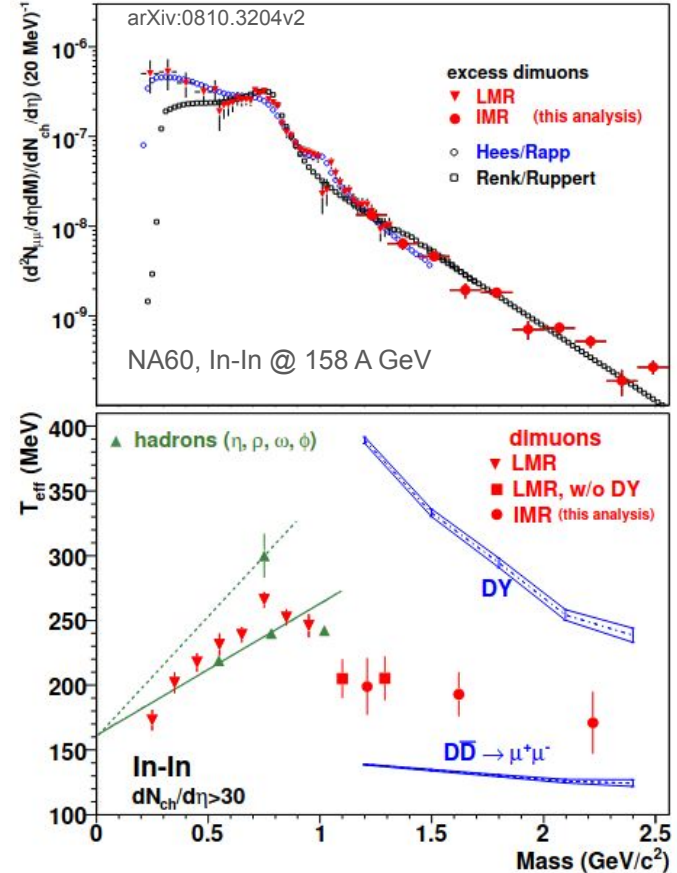


- Կարևոր է ֆիզիկական վերլուծության համար
 - Բարձր արդյունավետություն, լավ լուծողականություն, ցածր կեղծ մասնիկների տոկոս
 - Այդ ցուցանիշների ճշգրիտ գնահատում

Չափումների օրինակներ

Ջերմային դիմուռներ

- Ինչպես տաք միջավայր, ակնկալվում է որ QGP-ն ֆոտոններ կճառագայտի, ինչպես իրական, այնպես էլ վիրտուալ (դիելեկտրոններ և դիմուռներ)
- Դրանք հատկապես կարևոր ազդանշաններ են, քանի որ այս էլեկտրամագնիսական "զոնդերը" չեն մասնակցում ուժեղ փոխազդեցություններին: Արտադրուց անմիջապես հետո նրանք լքում են փոխազդող միջավայրը առանց փոփոխության: Այսպիսով, նրանք թույլ են տալիս հասկանալ QGP-ի զարգացման և հաղորնիզացիայի բոլոր փուլերից:
- Ջերմային (Պլանկյան) սպեկտր ունեցող դիմուռների ճառագայտումը (դիմուռների այլ աղբյուրները հաշվի առնելուց հետո) իսկապես դիտարկվել է In-In բախումներում ժամանակ SPS-ում NA60 էքսպերիմենտի կողմից:



Միջուկային փոփոխման գործակից

- Եթե AA բախումը անկախ քր բախումների սուպերպոզիցիա է, ապա AA բախումների կոշտ պրոցեսի X սպեկտրը կարող է ստացվել քր սպեկտրը նուկլոն-նուկլոն բախումների

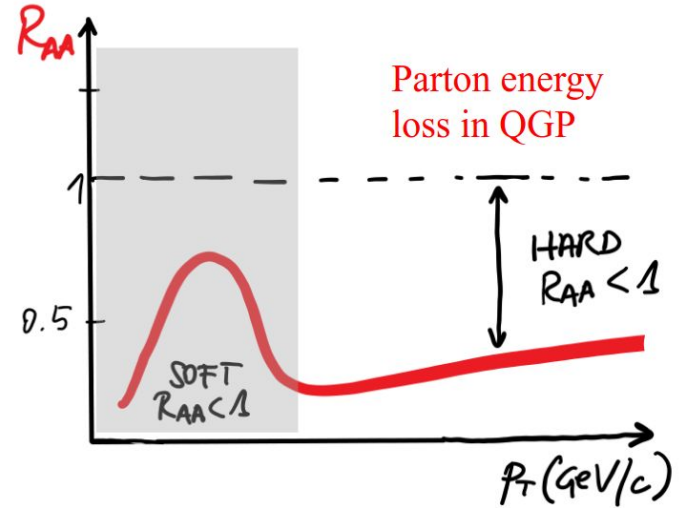
N_{coll} քանակով բազմապատկելով:

Օրինակ՝ $dN_{AA} / dp_T = N_{coll} \times dN_{pp} / dp_T$

- AA բախման ընթացքում ստեղծված միջավայրի ազդեցությունը բնութագրում են R_{AA} գործակցով.

$$R_{AA}(X) = \frac{1}{\langle N_{coll} \rangle} \frac{X_{AA}}{X_{pp}}$$

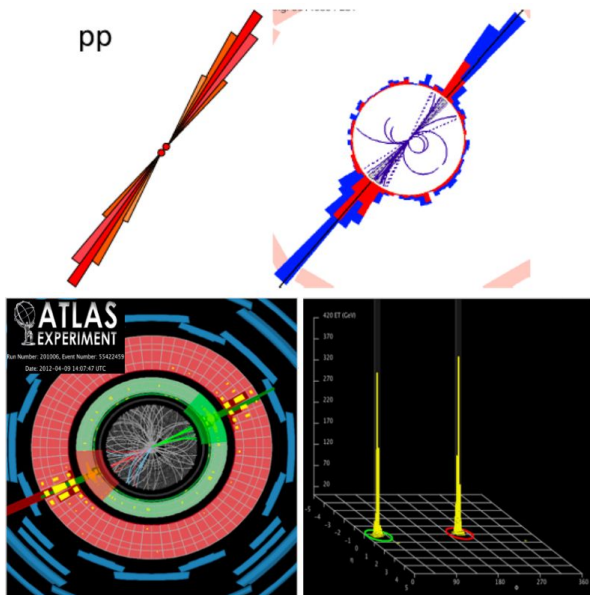
- $R_{AA} = 1$ նշանակում է թափանցիկ միջավայր
- $R_{AA} < 1$ նշանակում է թո միջավայրը փոխազդում (ճնշում) է պարտոնների հետ



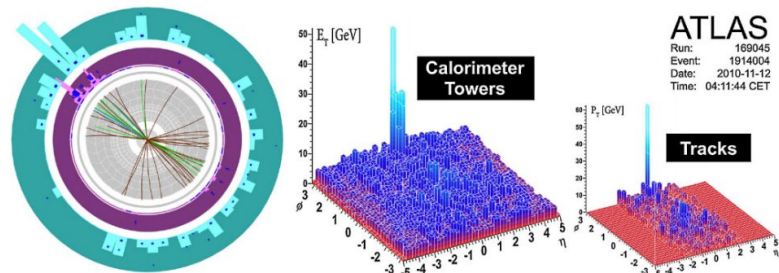
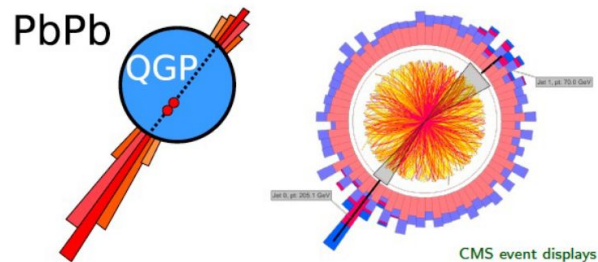
Ջեթեր և նրանց «հանգեցում» (jet quenching)

- Բախման վաղ փուլերում, կոշտ ցրումները առաջացնում են մեկը մյուսին հակառակ ուղղությամբ շարժվող քվարկներ, որոնք մասնատվում են և ձևավորում հաղորդների փնջեր (ջեթեր):
→ Ֆրագմենտացիա վակուումում

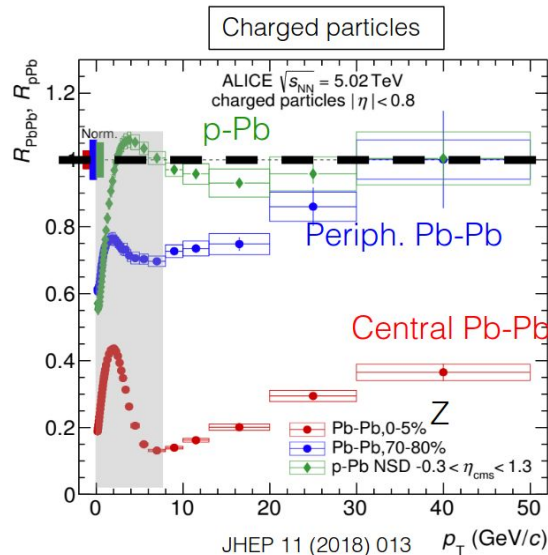
- QGP-ի դեպքում, գունավոր քվարքերը անցնում են և փոխազդում գունավոր միջավայրի հետ.
→ Ֆրագմենտացիա միջավայրում
→ Ջեթերի «հանգեցում» (Էներգիայի կորուստ)



ATLAS, pp collision event display

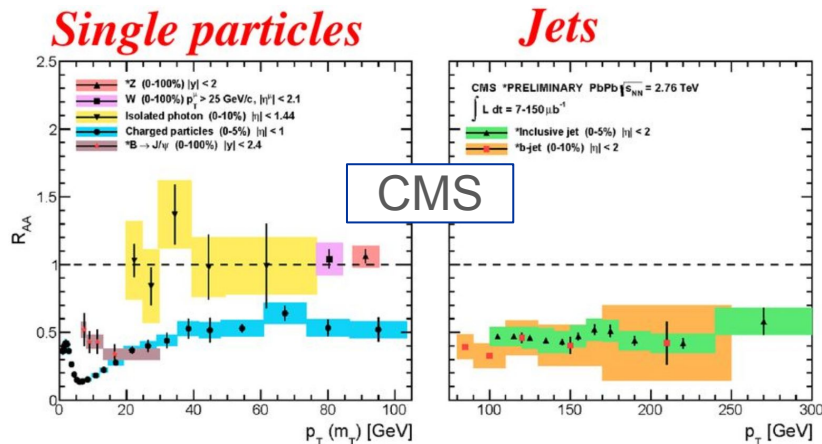
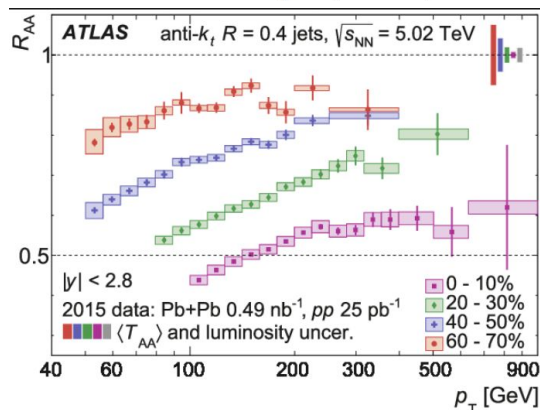


Ջեթեր և նրանց “հանգեցում” (jet quenching)

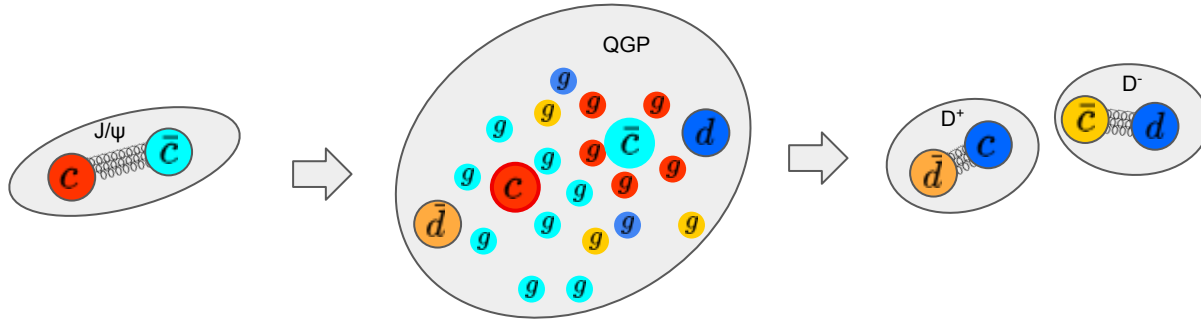


Բոլոր էքսպերիմենտները դիտարկում են AA բախումներում բարձր p_T հադրոնների ելքի ճնշումը:

Ճնշման փաստն ինքնին չի ապացուցում QGP գոյությունը. նման ազդեցություն կարող է առաջանալ նաև սովորական հադրոնային նյութի հետ փոխազդեցության հետևանքով: Դրանք տարբերակելու համար անհրաժեշտ է կիրառել քանակական մոդելներ:



J/ψ ($c\bar{c}$) մեզոնի ճնշում

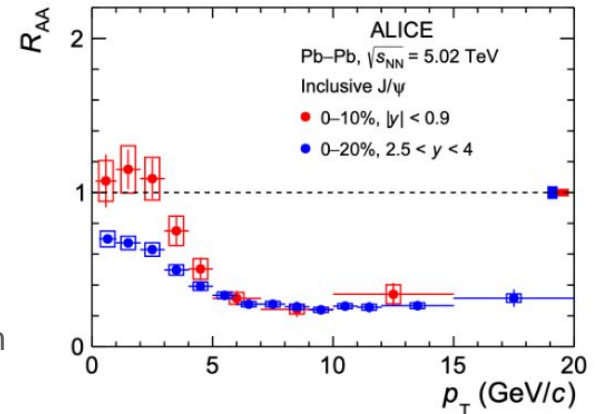
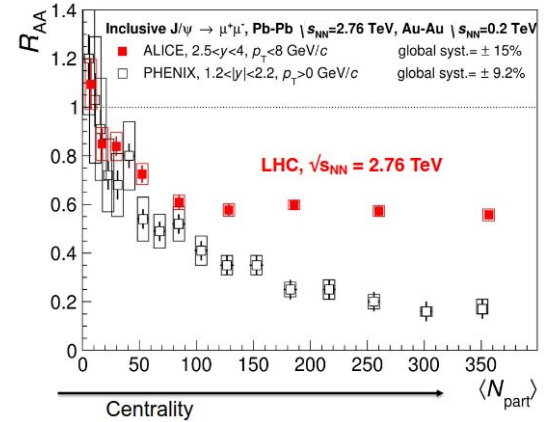


QGP-ի առաջացման դեպքում, c և \bar{c} քվարքերի միջև պոտենցիալը կարող է Էկրանավորվել բևեռացված գույնային լիցքով (Դեբայի Էկրանավորմանը նման): Այս դեպքում c և \bar{c} - ն կարող գույնային դաշտը թուլանում է ազատ գույնային լիցքերի առկայության պատճառով:

Արդյունքում, c և \bar{c} քվարքերը կարող են իրարից անկախ հաղորնացվել սառեցման փուլում՝ մոտակայքում գտնվող թեթև քվարքեր վերցնելով՝

$D\bar{D}$ մեզոններ ձևավորելով:

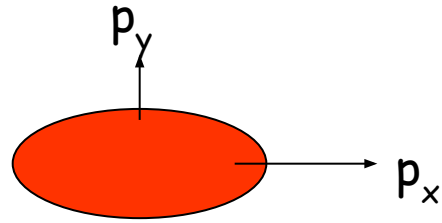
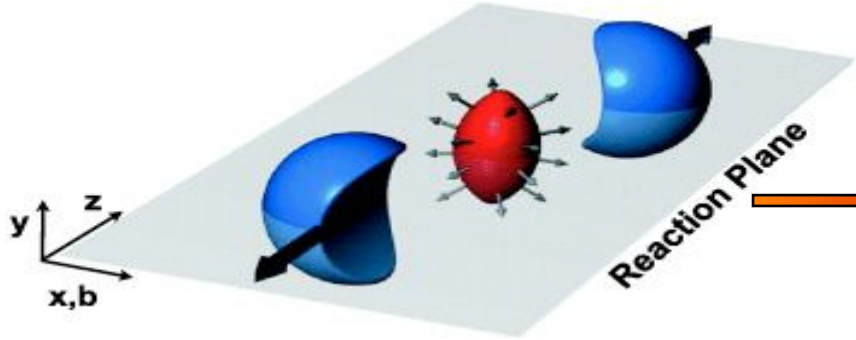
Աիդ եֆեկտը դիտարկվել է, և այն ավելի թույլ է LHC-ում քան ավելի ցածր էներգիաների դեպքում (RHIC, SPS): Դա նկարագրվում է J/ψ-ի մասնակի վերականգնմամբ հմայիչ զույգերի ավելի ուժեղացված արտադրության LHC-ի ավելի տաք և երկարատև QGP փուլի շնորհիվ



Հիդրոդինամիկ հոսքեր

Սկզբնական տարածական անհզոտրոպիա

Իմպուլսների անհզոտրոպիա բախումից հետո



- Անհզոտրոպ ճնշման գրադիենտ => անհզոտրոպ իմպուլսներ
- Ուժեղ կապ + ցածր մածուցիկություն => հիդրոդինամիկ հոսքեր

Անհզատրոպիան նկարագրվում է Ֆուրիեի շարքի գործակիցներով

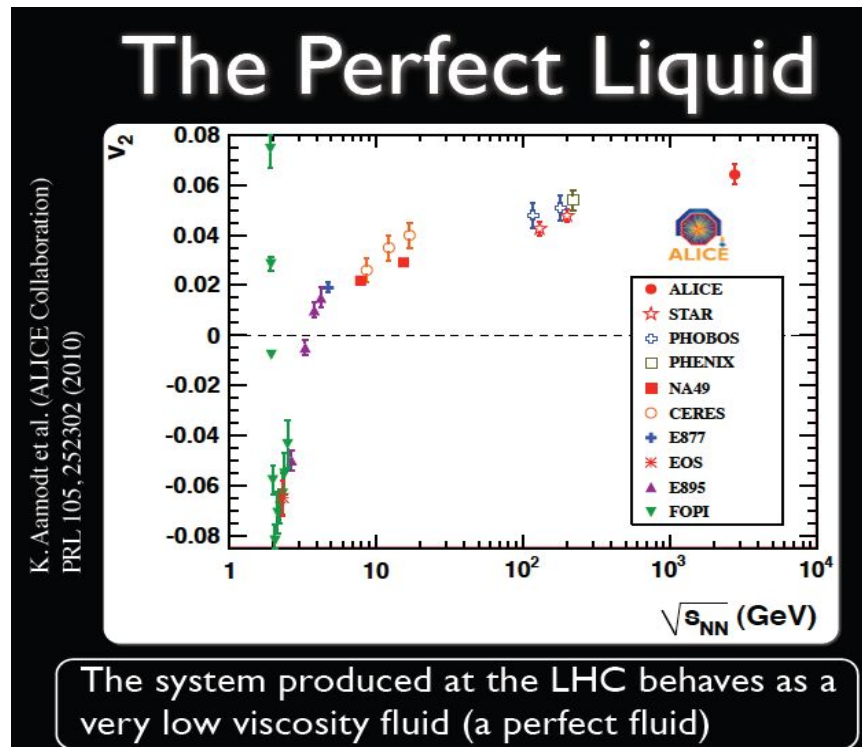
$$E \frac{d^3 N}{d^3 p} = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2 N}{p_T dp_T dy} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos[n(\phi - \Psi_n^{RP})] \right)$$

Մասնավորապես, ազիմուտալ ասիմետրիայի v_2 գործակիցն է կարևոր

Հիդրոդինամիկա
Kolb & Heinz 2001

Հիդրոդինամիկ հոսքեր

- v_2 -ը բախումում ցկած մասնիկների հոսքի ազիմուտալային անիզոտրոպիայի չափն է
- Այն հնարավորություն է տալիս ուսումնասիրել համակարգի վաղ փուլը, երբ տարածական անիզոտրոպիան առավելագույնն է:
- Չափված այդ և ուրիշ v_n գործակիցները հիդրոդինամիկական մոդելների հետ համեմատելով չափում են առաջացած միջավայրի մածուցիկությունը:



LHC-ում դիտարկված հիդրոդինամիկական հոսքերը բնութագրվում են շատ ցածր մածուցիկությամբ, որը մոտ է իդեալական հեղուկի: Ինչը կանխատեսվում է QGP-ի ծնման դեպքում...

Մմփոփում

- Ի՞նչ է Քվարկ-Գլյուոնային Պլազման (QGP)
 - Մի նյութի վիճակ, որտեղ քվարքերը և գլյուոնները իդեալական հեղուկի նման փոխազդում են մեծ ծավալում (հադրոնների մեջ պարփակված լինելու տեղակ):
- LHC-ի և նրա էքսպերիմենտների դերը ՔԳՊ-ու հետազոտություններում
 - LHC-ն ապահովում է առավելագույն էներգիայի բախումներ, որոնք հնարավորություն են տալիս ուսումնասիրել QGP-ի ձևավորումը և հադրոնիզացիան:
- QGP-ի ապացույցները՝ դիտարկումները ներառում են:
 - Բարձր p_T հադրոնների և ջեթերի ճնշում:
 - Ջերմային սպեկտրով դիմոնոնների դիտում:
 - Ցածր մածուցիկություն ցուցաբերող հիդրոդինամիկական հոսքեր:
 - ...
- QGP-ի ուսումնասիրությունների կարևորությունը
 - Ուժեղ փոխազդեցությունների և վաղ տիեզերքի պայմանների հասկանալու միջոց: